МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина

Толочко Н.К., Нукешев С.О., Романюк Н.Н., Мендалиева С.И.

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ И РЕМОНТЕ МАШИН

Утверждено Академическим советом университета
в качестве учебного пособия

Нур-Султан 2022

УДК 621.01 (075.8)
ББК 34.5 я73
А28

Рецензенты:

Миранович А.В., - к.т.н., доцент, первый проректор учреждения образования "Белорусский государственный аграрный технический университет".

Шеров К.Т. - д.т.н., профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» КАТУ им. С.Сейфуллина

Толочко Н.К., Нукешев С.О., Романюк Н.Н., Мендалиева С.И.

Аддитивные технологии в производстве и ремонте машин: учебное пособие. – Нур-Султан: КАТУ им. С. Сейфуллина, 2022. – 184 с.

ISBN 978-601-257-382-4

Пособие посвящено вопросам повышения эффективности производства и ремонта машин на основе использования аддитивных технологий. Рассмотрены современное состояние развития и особенности реализации разных видов аддитивных технологий, их достоинства и недостатки. Значительное внимание уделено проектированию деталей машин, создаваемых с помощью аддитивных технологий, применению аддитивных технологий для изготовления деталей машин, оснастки и инструмента, а также для восстановления изношенных и поврежденных деталей. Особое место отведено вопросам использования аддитивных технологий при производстве и ремонте сельскохозяйственной техники.

Данное издание предназначено для студентов технических и аграрных вузов, аспирантов и преподавателей, интересующихся проблемами научно-технологического развития машиностроения и агропромышленного производства, а также научных, инженерных и производственных работников, специализирующихся в машиностроительной и агропромышленной сферах.

УДК 621.01 (075.8)

ББК 34.5 я73
А28

ISBN 978-601-257-382-4

©Толочко Н.К. и др., 2022
©КАТУ им.С.Сейфуллина, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 6
1. Аддитивные технологии: общая характеристика 7
1.1 Аддитивные технологии: вопросы терминологии 7
1.2 Общая схема реализации аддитивных технологий 8
1.3 Классификация аддитивных технологий 9
2. Разновидности аддитивных технологий 12
2.1 Общая характеристика разных видов аддитивных технологий 12
2.2 Fused Deposition Modeling 14
2.3 Multiphase Jet Solidification 16
2.4 Direct Ink Writing 16
2.5 Inkjet Printing 17
2.6 Three Dimensional Printing 19
2.7 Laminated Object Manufacturing 20
2.8 Ultrasonic Additive Manufacturing 22
2.9 Stack-cut-bond-Sheet Lamination 23
2.10 Cut-stack-bond-Sheet Lamination 25
2.11 Stereolithography Apparatus 27
2.12 Digital Light Processing 29
2.13 Mask Projection Stereolithography 30
2.14 Selective Laser Sintering 30
2.15 Selective Laser Melting 32
2.16 Electron beam melting 34
2.17 Direct Laser Metal Deposition 35
3. Достоинства и недостатки аддитивных технологий 37
3.1 Сравнительная оценка аддитивных и традиционных технологий 37
3.2 Сравнительная оценка разных видов аддитивных технологий 41
3.3 Гибридные аддитивные технологии 42
4. Области применения аддитивных технологий 45
4.1 Факторы и особенности применения аддитивных технологий 45
4.2 Аддитивные технологии в производственной сфере 46
4.3 Аддитивные технологии в социальной сфере 50
5. Проектирование деталей машин для аддитивного производства 54
5.1 Методы проектирования деталей для аддитивного производства 54
5.2 Аддитивные технологии и возможности проектирования деталей 57
5.3 Аддитивные технологии и ограничения проектирования

деталей 69
5.4 Роль быстрого прототипирования при проектировании деталей 70
6. Аддитивные технологии производства деталей машин 77
6.1 Производство деталей из металлов 77
6.2 Производство деталей из пластмасс 83
6.3 Производство сборок 84
6.4 Производство подвижных соединений 86
6.5 Сочетание аддитивных и традиционных технологий изготовления изделий 87
6.6 Сочетания разных аддитивных технологий изготовления изделий 93
6.7 Практика производственная освоения аддитивных технологий 93
7. Аддитивные технологии производства оснастки и инструмента 96
7.1 Производство формообразующей оснастки (литейная оснастка, штамповая оснастка, специальная оснастка) 96
7.2 Производство инструмента (электроды-инструменты, режущие инструменты) 102
8. Аддитивные технологии ремонта деталей машин 106
8.1 Роль аддитивных технологий в ремонте машин 106
8.2 Ремонт металлических деталей 107
8.3 Ремонт пластмассовых деталей 114
8.4 Организация ремонтных работ на основе применения аддитивных технологий 117
9. Качество производства деталей по аддитивным технологиям 120
9.1 Точность изготовления 120
9.2 Качество поверхности 121
9.3 Механическая прочность 129
10. Производительность и себестоимость аддитивных технологических процессов 136
10.1 Производительность аддитивных технологических процессов 136
10.2 Себестоимость аддитивных технологических процессов 141
11. Основные направления применения аддитивных технологий в агропромышленном комплексе 145
11.1 Современные тенденции развития сельскохозяйственной техники 145
11.2 Основные направления применения аддитивных технологий при производстве сельскохозяйственной техники 148
11.3 Основные направления применения аддитивных 151

технологий при ремонте сельскохозяйственной техники
12. Оценка эффективности применения аддитивных технологий в агропромышленном комплексе 154
12.1 Оценка эффективности применения аддитивных технологий при производстве сельскохозяйственной техники 154
157
12.2 Оценка эффективности применения аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники 164
164
13. История развития аддитивных технологий 166
13.1 История терминологии в области аддитивных технологий 169
13.2 Предпосылки развития аддитивных технологий
13.3 Важнейшие этапы развития аддитивных технологий 172
172
14. Перспективы развития аддитивных технологий 174
14.1 Основные особенности рынка аддитивных технологий 174
14.2 География рынка аддитивных технологий 177
14.3 Ведущие участники рынка аддитивных технологий
14.4 Тенденции мирового развития аддитивных технологий 182

Список литературы

ВВЕДЕНИЕ

Аддитивные технологии, или, как их иначе называют, технологии 3D-печати, появившись в 1980-е годы, прошли путь бурного развития и к настоящему времени вторглись практически во все сферы человеческой деятельности. Наибольшее распространение они получили в машиностроении, где с помощью их осуществляются производство и ремонт деталей машин. В основном аддитивные технологии применяются в авиакосмической, автомобильной, оборонной промышленности. В последние годы они находят все более широкое применение в производстве и ремонте деталей сельскохозяйственной техники.

Для успешного продвижения аддитивных технологий в сферах машиностроения и агропромышленного производства необходимо обеспечить подготовку соответствующих специалистов. В связи с этим требуется провести обобщение и систематизацию знаний и опыта по вопросам применения этих технологий для производства и ремонта деталей машин, в том числе деталей сельскохозяйственной техники. Именно этому посвящено предлагаемое пособие, в котором рассматривается современное состояние развития аддитивных технологий и их применения в машиностроительной и агропромышленной сферах.

Пособие состоит из 14 разделов. В 1-м разделе дана общая характеристика аддитивных технологий, обсуждены вопросы терминологии и классификации. Во 2-м, 3-м и 4-м разделах описаны разные виды аддитивных технологий, их достоинства и недостатки, различные сферы их применения. В последующих разделах, с 5-го по 10-й, рассмотрены вопросы применения аддитивных технологий для изготовления деталей машин, оснастки и инструмента, а также для восстановления изношенных и поврежденных деталей, включая вопросы качества, производительности и себестоимости аддитивного производства. В 11-м и 12-м разделах рассмотрены особенности применения аддитивных технологий при производстве и ремонте сельскохозяйственной техники. Заключительные 13-й и 14-й разделы посвящены истории и перспективам развития аддитивных технологий.

Пособие предназначено для студентов технических и аграрных вузов, аспирантов и преподавателей, которые интересуются проблемами научно-технологического развития машиностроения и агропромышленного производства, а также научных, инженерных и производственных работников, специализирующихся в машиностроительной и агропромышленной сферах.

При написании пособия авторами использовались многочисленные литературные источники (монографии, учебные

пособия, научные статьи, интернет-сайты), список основных из них представлен в конце книги.

1. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

1.1 Аддитивные технологии: вопросы терминологии

Аддитивные технологии (Additive Technologies) – это обобщенное название технологий изготовления трехмерных (3D) изделий по их компьютерным моделям путем последовательного добавления (наращивания) материала. Свое название (в буквальном переводе с английского – «добавляющие») они получили от английского слова «add» (добавлять) – в противоположность традиционным «вычитающим», или субтрактивным, технологиям(Subtractive Technologies), предусматривающим достижение требуемой формы изделия путем удаления («вычитания») материала с заготовки в результате ее механической, электроэрозионной и т.п. обработки.

Аддитивные технологии обычно называют сокращенно АМ-технологиями (Additive Manufacturing – аддитивное производство).

Впервые обобщенное определение АМ-технологий предложено международной организацией ASTM International (American Society for Testing and Materials – Американское общество по испытанию материалов), занимающейся разработкой технических стандартов.

В 2009 г. был опубликован стандарт ASTM F2792 «Стандартная терминология аддитивного производства» – первый ASTM-стандарт в АМ-сфере. Согласно этому стандарту, под АМ-технологиями понимается «process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing technologies» – «процесс объединения материала с целью создания объекта из данных 3D-модели, как правило, слой за слоем, в отличие от субтрактивных производственных технологий».

В 2015 г. на смену стандарту ASTM F2792 был издан стандарт ISO/ASTM 52900:2015 «Additive Manufacturing – General principles – Terminology» – «Аддитивное производство. Общие принципы. Терминология». Он расширил первоначальную АМ-терминологию. Это был первый стандарт в АМ-сфере, разработанный совместно Международной организацией по стандартизации (ISO) и ASTM International, а затем принятый Европейским комитетом по стандартизации (CEN). В 2021 г. былаизданаегообновленнаяверсия – ISO/ASTM 52900:2021 «Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary» – «Аддитивноепроизводство. Общие принципы. Основы и словарь».

Также был издан ряд других ASTM-стандартов в АМ-сфере.

АМ-технологии начали интенсивно развиваться с конца 1980-х годов. Их развитию способствовало широкое распространение цифровых технологий в области проектирования, прежде всего, систем CAD (Computer Aided Design) – программных пакетов, предназначенных для создания 3D-моделей.

Первоначально АМ-технологии называли технологиями быстрого прототипирования (англ. Rapid Prototyping), поскольку в основном они предназначались для создания прототипов (опытных образцов) изделий. В настоящее время технологии быстрого прототипирования рассматриваются как часть АМ-технологий, которые позволяют создавать не только прототипы изделий, но и готовые изделий.

Нередко АМ-технологии с учетом характерных особенностей процессов, лежащих в их основе, называют технологиями послойного синтеза. Имеется еще одно их весьма популярное название – 3D-печать. Соответственно, устройства, с помощью которых они реализуются, называют 3D-принтерами.

1.2 Общая схема реализации аддитивных технологий

Существуют разнообразные виды АМ-технологий, однако все они реализуются по общей схеме, которую можно представить в виде следующей последовательности операций (рис. 1.1):

- построение 3D-модели изделия в CAD-системе;
- экспорт 3D-модели в STL- файл;
- разделение 3D-модели на горизонтальные сечения (слои) с помощью специальной программы-слайсера (иначе эта операция называется слайсингом);
- 3D-печать – послойный синтез натурного объекта (изделия) по данным CAD-модели, считываемым 3D-принтером с STL-файла;
- финишная обработка полученного изделия (иначе эта операция называется постобработкой).

Послойный синтез осуществляется путем последовательного нанесения материала слой за слоем, обычно снизу-вверх. Каждый наносимый слой по своему сечению совпадает с соответствующим слоем 3D-модели. В процессе нанесения смежные слои связываются между собойразличными способами (спеканием, сплавлением, склеиванием, полимеризацией), так что в результате формируется цельное изделие.

Рисунок 1.1 - Схема реализации АМ-технологий

1.3 Классификация аддитивных технологий

АМ-технологии классифицируют по различным признакам. Важнейшими их них являются:

- виды используемых материалов;
- методы нанесения слоев материалов;
- виды превращений материалов в процессе нанесения слоев и формирования структуры изделий.

Все материалы, используемые в АМ-технологиях, делятся на основные и вспомогательные. Основные материалы иначе называют строительными материалами, из них непосредственно происходит построение изделий. Вспомогательные материалы способствуют осуществлению процесса построения изделий. Они используются не во всех АМ-технологиях, а только в некоторых из них. К ним относятся связующие материалы, которые связывают (склеивают) исходные строительные материалы, а также поддерживающие материалы, которые поддерживают выступающие (нависающие) части конструкции строящихся изделий.

В АМ-технологиях, применяемых при изготовлении и ремонте деталей машин, в качестве исходных строительных материалов служат полимеры, металлы и неорганические материалы (гипс, песок, керамика), которые могут использоваться как индивидуально, так и в сочетаниях друг с другом (табл. 1.1). Некоторые из них являются жидкостями, но большинство их находится в твердом состоянии – в виде порошков, волокон, проволок или прутков, листов или пленок.

Таблица 1.1 - Исходные строительные материалы для аддитивных технологий

Жидкофазное состояние	Твердофазное состояние		
	Вид приготовления		
	Порошки	Волокна, прутки или проволоки	Листы или пленки
Фотополимеры	Термопластичные	Термопластичные	Термопластичные

	полимеры, литейный воск, парафин, металлы, гипс, песок, керамика	полимеры, металлы	полимеры, металлы, бумага

Различают два основных метода нанесения слоев исходногостроительного материала (соответственно, два типа АМ-технологий), которые имеют следующие англоязычные названия: «Bed Deposition» (осаждение на платформе) и «Direct Deposition» (прямое осаждение).

Согласно АМ-технологиям типа Bed Deposition исходный материал наносят на какую-либо платформу сплошным слоем, затем его в этом слое подвергают селективной обработке (с помощью локально-избирательных воздействий), в результате чего он изменяет свое первоначальное состояние (структуру, свойства), т.е. претерпевает определенные превращения, формируя слоистый фрагмент создаваемого изделия. При этом остальная (необработанная) часть исходного материала остается неизменной. Далее процесс повторяется, на сформировавшийся первый слоистый фрагмент наращивают очередные фрагменты до тех пор, пока не завершится создание всего изделия.

Согласно АМ-технологиям типа Direct Deposition, исходный материал непосредственно наносят последовательными слоями. При этом сначала на платформу в конкретных местах наносят первый слой, затем на него наращивают очередные слои. В процессе осаждения материал изменяет свое первоначальное состояние (подобно тому, как это имеет место в случае Bed Deposition), в результате чего формируются слоистые фрагменты создаваемого изделия.

Исходный строительный материал в процессе нанесения слоев и формирования структуры изделия подвергается следующим превращениям:

- фотополимеризация (отверждение жидких фотополимеров);
- спекание или переплавка порошков;
- связывание (склеивание) порошков связующими компонентами;
- размягчение и последующее отверждение термопластичных полимеров.

Согласно классификации ASTM, предложенной в 2012 г., существуют 7 категорий АМ-технологий, представленных в табл. 1.2.

Таблица 1.2 - Категории АМ-технологий по ASTM-классификации

№п/п	Название категории (англ./рус.)	Краткая характеристика АМ-технологий
1	Material Extrusion, ME / «выдавливание материала»	Послойное нанесение расплавленного или пастообразного

		строительного материала путем выдавливания через экструдер
2	Material Jetting, MJ / «струйное разбрызгивание материала»	Послойное струйное нанесение строительного материала
3	Binder Jetting, BJ / «струйное разбрызгивание связующего»	Послойное струйное нанесение связующего материала
4	Sheet Lamination, SL / «листовое ламинирование»	Послойное нанесение листового строительного материала
5	Vat Photopolymerization, VP / «фотополимеризация в ванне»	Послойное отверждение фотополимерного строительного материала
6	Powder Bed Fusion, PBF / «сплавление порошкового слоя»	Спекание или сплавление послойно наносимого порошкового строительного материала
7	Directed energy deposition, DED / «направленный подвод энергии»	Одновременное подведение строительного материала и энергии для его плавления непосредственно в место построения

Контрольные вопросы

1. Что представляют собой аддитивные технологии?
2. В чем состоит различие между аддитивными и субтрактивными технологиями?
3. Назовите последовательность основных операций, характерных для аддитивных технологий.
4. Назовите классификационные признаки аддитивных технологий.
5. Охарактеризуйте основные и вспомогательные материалы, используемые в аддитивных технологиях.
6. Чем различаются аддитивные технологии типа «Bed Deposition» и «Direct Deposition»?
7. Приведите примеры исходных строительных материалов, применяемых в аддитивных технологиях.
8. Каким видам превращений подвергаются строительные материалы в процессе нанесения слоев и формирования структуры изделия в рамках реализации аддитивных технологий?
9. Назовите категории аддитивных технологий по ASTM-классификации.
10. Дайте краткую характеристику аддитивным технологиям, относящимся к разным категориям по ASTM-классификации.

2. РАЗНОВИДНОСТИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

2.1 Общая характеристика разных видов аддитивных технологий

На сегодняшний день известно несколько десятков разновидностей АМ-технологий, которые различаются не только особенностями процессов создания 3D-изделий, но также особенностями конструкции и функционирования 3D-принтеров и свойствами исходных строительных материалов, используемых для построения. Кроме того, они различаются своими фирменными названиями.

В табл. 2.1 приведен перечень основных видов АМ-технологий, применяемых при изготовлении и ремонте деталей машин (технологии распределены по соответствующим категориям в рамках ASTM-классификации, для некоторых видов АМ-технологий, кроме основного названия, дополнительно в скобках указаны другие названия, также получившие распространение).

Таблица 2.1 - Основные виды АМ-технологий, применяемых при изготовлении и ремонте деталей машин

№ п/п	Виды АМ-технологий	Категории АМ-технологий по ASTM-классификации
1	Fused Deposition Modeling, FDM – «создание объектов наплавкой» / Fused Filament Fabrication, FFF – «производство расплавленными волокнами» /	Material Extrusion, ME
2	Multiphase Jet Solidification, MJS – «отверждение многофазной струи»	
3	Direct Ink Writing, DIW – «прямая запись чернилами»	
4	Inkjet Printing, IJP – «чернильно-струйная печать» / Multi-Jet Modeling, MJM – «многоструйное создание объекта» / Poly-Jet – «поли-джет» /	Material Jetting, MJ
5	Three Dimensional Printing, 3DP – «трехмерная печать» / Dropon Powder, DoP – «капля на порошок» /	Binder Jetting, BJ

Продолжение таблицы 2.1

6	Laminated Object Manufacturing, LOM – «производство ламинированных объектов» / Stack-bond-cut-Glue-Sheet Lamination, SBC-Glue-SL – «листовое ламинирование по схеме «пакетирование-соединение-резка» со склеиванием» / Selective Deposition Lamination, SDL – «ламинирование селективным осаждением»	Sheet Lamination, SL
7	Ultrasonic Additive Manufacturing, UAM – «ультразвуковое аддитивное производство» / Stack-bond-cut-US-Weld-Sheet Lamination, SBC-US-Weld-SL – «листовое ламинирование по схеме «пакетирование-соединение-резка» с ультразвуковой сваркой» /	
8	Stack-cut-bond-Sheet Lamination, SCB-SL – «листовое ламинирование по схеме «пакетирование-резка-соединение»	
9	Cut-stack-bond- Sheet Lamination, CSB-SL – «листовое ламинирование по схеме «резка-пакетирование-соединение»	
10	StereolithographyApparatus, SLA – «аппаратура стереолитографии»	Vat Photopolymerization, VP
11	Digital Light Processing, DLP – «цифровая оптическая обработка» / Projection Stereolithography, PSL – «проекционная стереолитография» / Digital Light Synthesis, DLS – «цифровой световой синтез»	
12	Mask Projection Stereolithography, MPSL – «масочная проекционная стереолитография» / Solid Ground Curing, SGC – «отверждение сплошного участка»	
13	Selective Laser Sintering, SLS – «селективное лазерное спекание»	Powder Bed Fusion, PBF
14	Selective Laser Melting, SLM – «селективное лазерное плавление» / Direct Metal Laser Sintering, DMLS – «прямое лазерное спекание металла»	
15	Electron beam melting, EBM – «электроннолучевое плавление»	
16	Direct Laser Metal Deposition, DLMD – «прямое лазерное осаждение металла» / Laser Engineered Net Shape, LENS – «лазерное создание заданной формы»	Directed Energy Deposition, DED

2.2 Fused Deposition Modeling

Сущность FDM-технологии: волокно из термопласта протягивается через экструдер, где расплавляется, а затем подается в место построения, где отверждается при охлаждении.

Схема реализации FDM-процесса показана на рис. 2.1.

Полимерное волокно разматывается с катушки и направляется в экструдер, который представляет собой устройство, оснащенное механическим приводом для подачи волокна, нагревательным элементом для плавления (размягчения) полимера и соплом, через которое осуществляется непосредственно экструзия (выдавливание) полимера. Нагревательный элемент нагревает сопло и плавит полимерное волокно, которое через сопло подается на платформу, где происходит построение изделия. Экструдер перемещается в горизонтальной и вертикальной плоскостях по специальной программе.

Процесс послойного построения изделия по FDM-технологии поясняется на рис. 2.2.

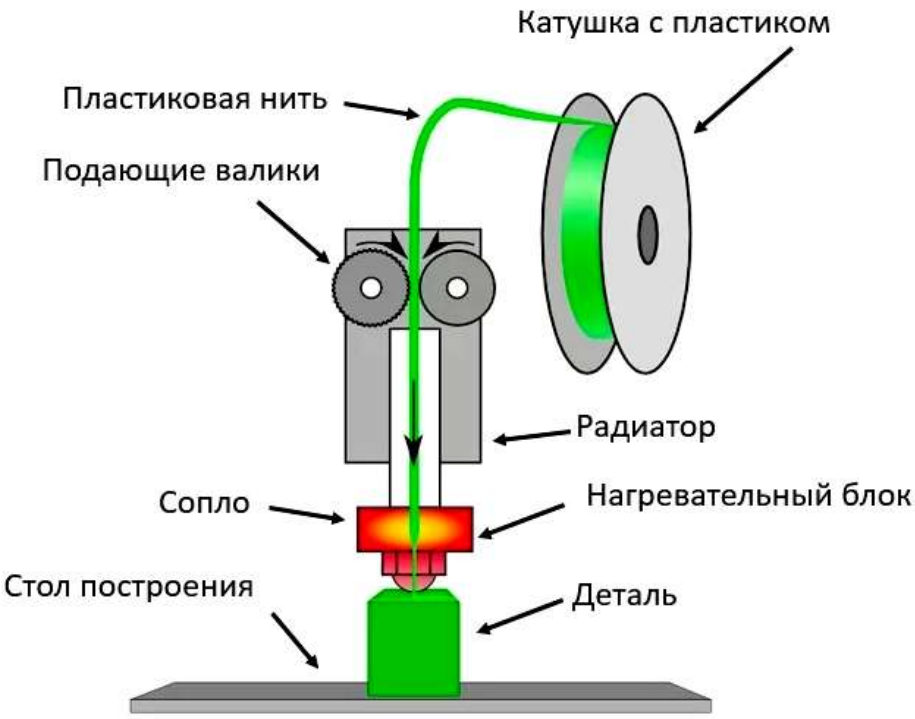


Рисунок 2.1 - Схема FDM- процесса

В качестве строительных материалов используются различные виды термопластичных полимеров: акрилонитрилбутадиенстирол (АБС-пластик), поликарбонат (ПС), полилактид (полимолочная кислота, ПЛА), полиэтилен высокого давления (ПЭВД), полифениленсульфон и

др., которые поставляются в виде тонких волокон, намотанных на катушки, как показано на рис. 2.3.

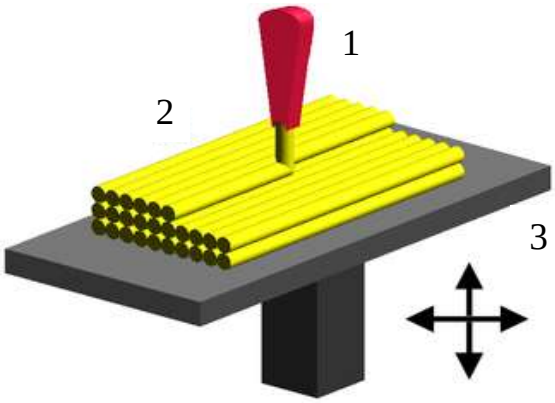


Рисунок 2.2 - Схема построения изделия по FDM-технологии

Рисунок 2.3 - Катушки с полимерным волокном для FDM-3D-печати

FDM – самая распространенная технология 3D-печати. В мире производятся в большом количестве сравнительно недорогие FDM-3D-принтеры как для промышленного применения, так и для массового потребителя. Некоторые их конструктивные варианты показаны на рис. 2.4 и 2.5.

Рисунок 2.4 - 3D-принтер Flash Forge Thor 400 для массового потребителя. Конструкция с открытой камерой. Рабочая зона: 400×400×400 мм

Рисунок 2.5 - Профессиональный 3D-принтер Stratasys F770. Рабочая зона: 1000×610×610 мм

2.3 Multiphase Jet Solidification

Сущность MJS-технологии: процесс построения изделия осуществляется по аналогии с FDM, отличие состоит в том, что в место построения изделия подается не расплавленное волокно из термопластичного полимера, а пастообразная смесь металлического порошка и связующего (пластификатора). Эта смесь выдавливается через подогреваемый экструдер. Затем полученную 3D-заготовку (ее называют грин-моделью – «green» означает «зеленая», сырая) помещают в печь для удаления связующего и последующего спекания.

Обычно заготовку подвергают сначала предварительному, а затем окончательному спеканию, в результате чего создается готовое изделие с высокой плотностью, равной 95-98% плотности компактного материала. При этом в зависимости от состава порошковых компонентов и связующего линейная усадка при спекании составляет 10-16%.

Возможен также иной подход к повышению плотности изделия – путем инфильтрации (т.е. пропитки) заготовки расплавленным металлом после ее предварительного спекания. Инфильтрат должен иметь более низкую температуру плавления, чем пористое тело заготовки, и не вступать с ним в реакции. Благодаря инфильтрации усадка существенно уменьшается и, кроме того, увеличивается прочность изделия.

Схема MJS-процесса показана на рис. 2.6, внешний вид MJS-3D-принтера – на рис. 2.7.

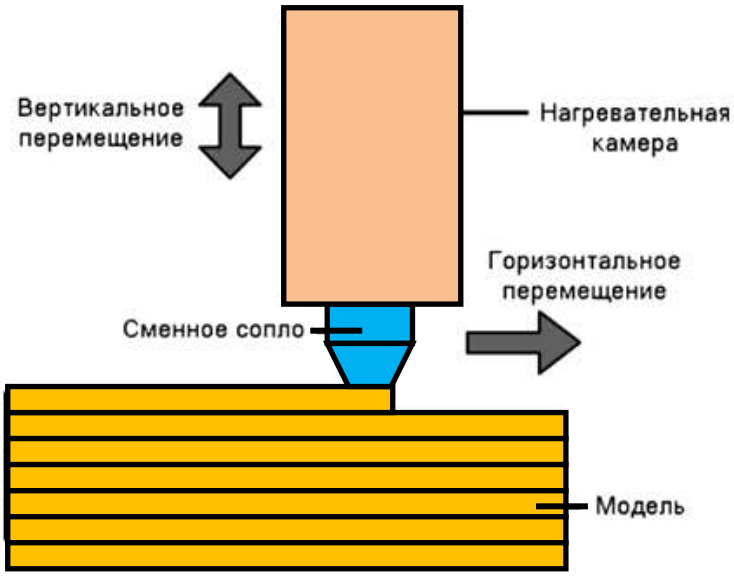


Рисунок 2.6 - Схема реализации MJS-процесса

2.4 Direct Ink Writing

Сущность DIW-технологии: процесс построения изделия осуществляется по аналогии с FDM, отличие состоит в том, что в место

построения изделия подается не расплавленное волокно из термопластичного полимера, а «чернила» в виде вязкотекучих материалов, которые выдавливаются из экструдера и сразу же отверждаются под действием разных факторов.

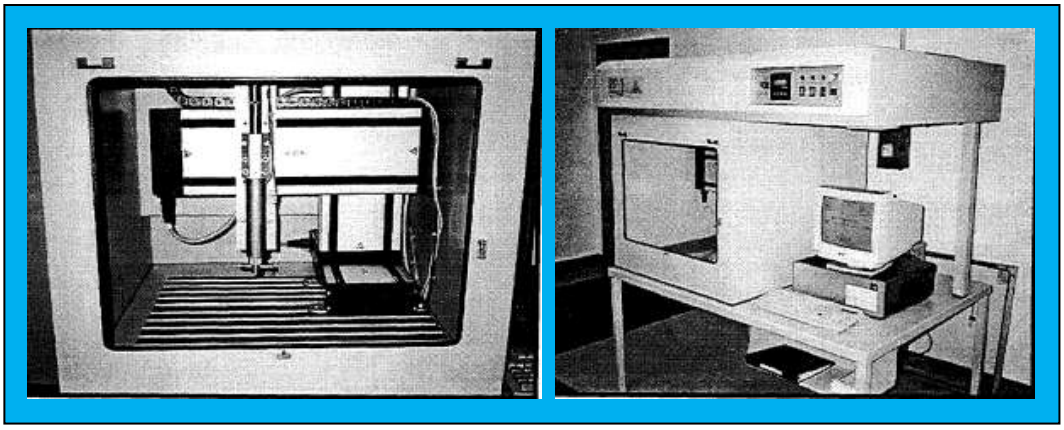


Рисунок 2.7 - 3D-принтер RP Jet-200 MJS
Слева – экструдер и система перемещения, справа – рабочая камера и пульт компьютерного управления

Например, таким фактором может быть ультрафиолетовое (УФ) облучение, если экструдируемый материал является фотополимером (рис. 2.8). Также экструдируемые материалы в зависимости от состава могут затвердевать в результате испарения содержащейся в них жидкости, гелеобразования, химических реакций, вызванных растворителем или изменением температуры.

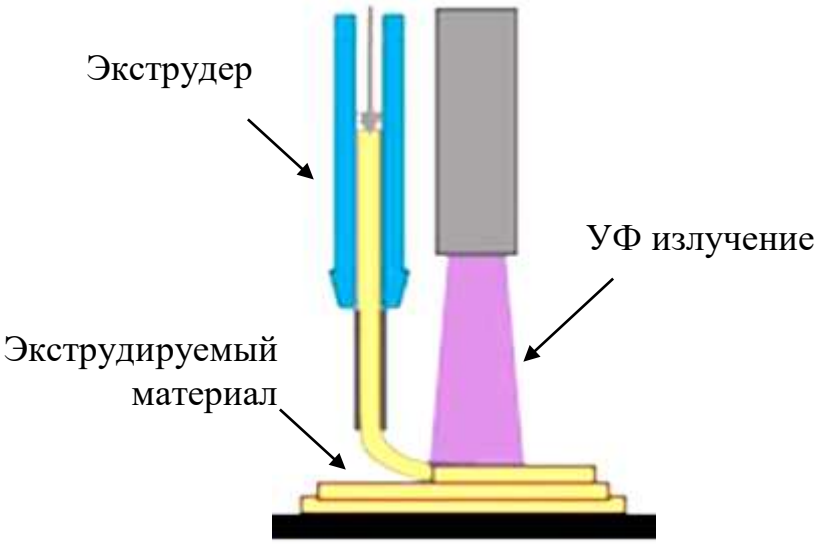


Рисунок 2.8 - Схема DIW-процесса

2.5 Inkjet Printing

Сущность IJP-технологии: «чернила» в виде жидкого фотополимера или расплавленного (нагретого до полужидкого состояния) термопластичного полимера (воскового материала) либо в виде суспензии впрыскивают через сопло печатающей головки в место построения изделия, где фотополимер и термопласт отверждаются под действием ультрафиолетового излучения или охлаждения соответственно, а твердые частицы суспензии агломерируются.

IJP-технология 3D-печати по принципу реализации подобна технологии 2D-печати, осуществляемой с помощью обычного струйного принтера. Основным элементом IJP-3D-принтера является многоструйная печатающая головка, которая имеет множество мельчайших сопел (это находит отражение в других названиях этой технологии – Multi-Jet Modeling и Poly-Jet). Через сопла печатающей головки выпрыскивается микрокаплями фотополимерная смола (или иной строительный материал). Особенность многоструйной 3D-печати состоит в том, что печатающая головка, перемещаясь над зоной печати, укладывает микрокапли фотополимерной смолы всей свой площадью, т.е. с участием всех сопел, которые включаются в работу селективно в соответствии с предварительно созданной управляющей программой. Как следствие, построение изделия происходит не в какой-либо отдельной точке, а сразу же всей плоскостью печатающей головки.

Схема MJM-процесса показана на рис. 2.9, внешний вид MJS-3D-принтера – на рис. 2.10.

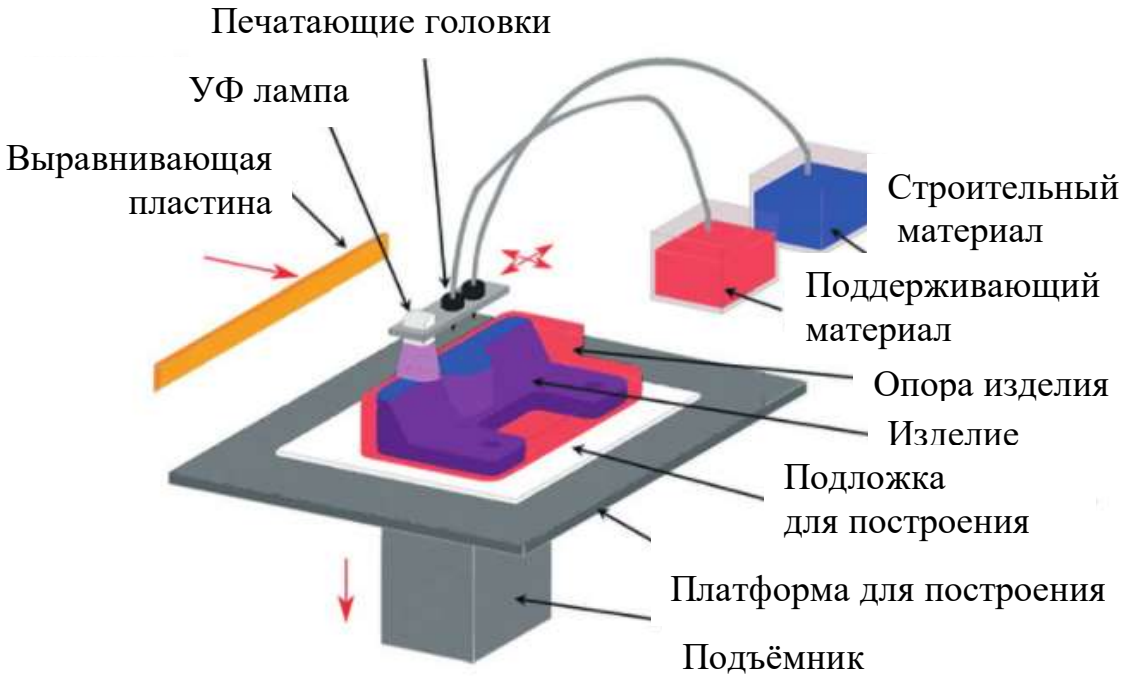


Рисунок 2.9 - СхемаMJM-процесса

2.6 Three Dimensional Printing

Сущность 3DP-технологии: порошок металла, полимера, стекла или др. строительного материала наносится послойно на платформу, на каждый слой с помощью струйной головки селективно каплями подается связующее, которое связывает (склеивает) частицы порошка между собой и с предыдущими слоями. Характерная особенность этой технологии, заключающаяся в подаче капель связующего на слой порошка, отсюда ее другое название – Drop on Powder.

Рисунок 2.10 - MJM-3D-принтер 3D Systems ProJet 3510 HD
Рабочая зона: 298×183×203мм

Технологии 3D-печати категории Binder Jetting, также как и технологии 3D-печати категории Material Jetting, относятся к струйным технологиям. Различие между ними состоит в том, что в первом случае в зону построения впрыскивают связующий реагент, а во втором – строительный материал.

Схема 3DP-процесса показана на рис. 2.11, внешний вид 3DP-принтера – на рис. 2.12.

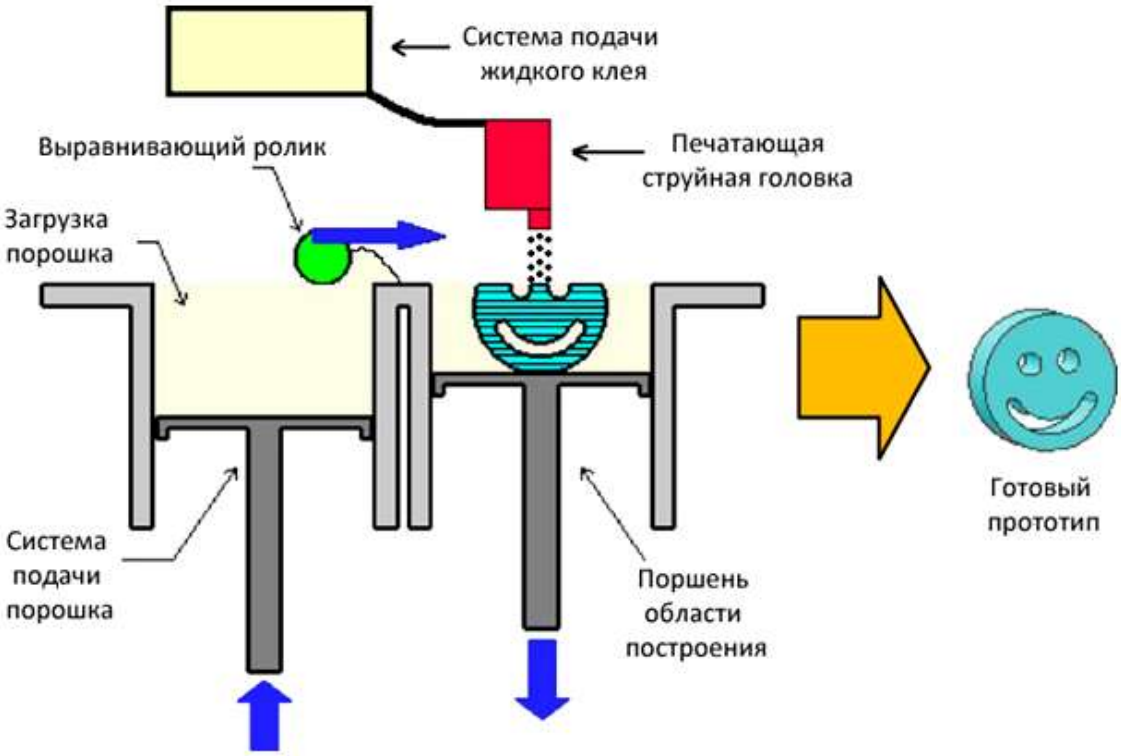


Рисунок 2.11 - Схема3DP-процесса

Рисунок 2.12 - 3DP-принтер ExOne M-Flex
Рабочая зона: 400×250×250 мм

2.7 Laminated Object Manufacturing

Сущность LOM-технологии: листовой строительный материал послойно укладывается в стопку, слои соединяются (склеиваются) друг с другом, причем из каждого слоя вырезаются выкройки требуемой конфигурации, а излишки материала удаляются.

Таким образом, LOM-процесс реализуется по схеме «пакетирование-соединение-резка со склеиванием», отсюда его другое название – Stack-bond-cut-Glue-Sheet Lamination (SBC-Glue-SL).

Строительный материал обычно используется в виде ленты, намотанной в рулон: это могут быть тонколистовая бумага, полимерная пленка, металлическая фольга и т.п. Поверхность ленты предварительно покрывается термоактивируемым клеем.

Построение изделия по LOM-технологии происходит следующим образом: листовой строительный материал периодически подается из рулона на рабочую платформу; нагретый валик прокатывается по слою, поданному на платформу, обеспечивая его приклеивание к нижележащему слою; лазерный луч вырезает в этом слое выкройку нужной формы, при этом лишние остатки слоя разрезаются на мелкие кусочки для последующего удаления; далее процедуры построения повторяются, после их завершения весь лишний материал удаляется, а полученное изделие снимается с платформы.

Схема LOM-процесса показана на рис. 2.13, внешний вид 3DP-принтера – на рис. 2.14.

Разновидностью LOM-технологии является SDL-технология, отличающаяся тем, что последовательно укладываемые листы строительного материала склеиваются не целиком по всей площади, а только по отдельным участкам, которые подлежат соединению в процессе построения изделия.

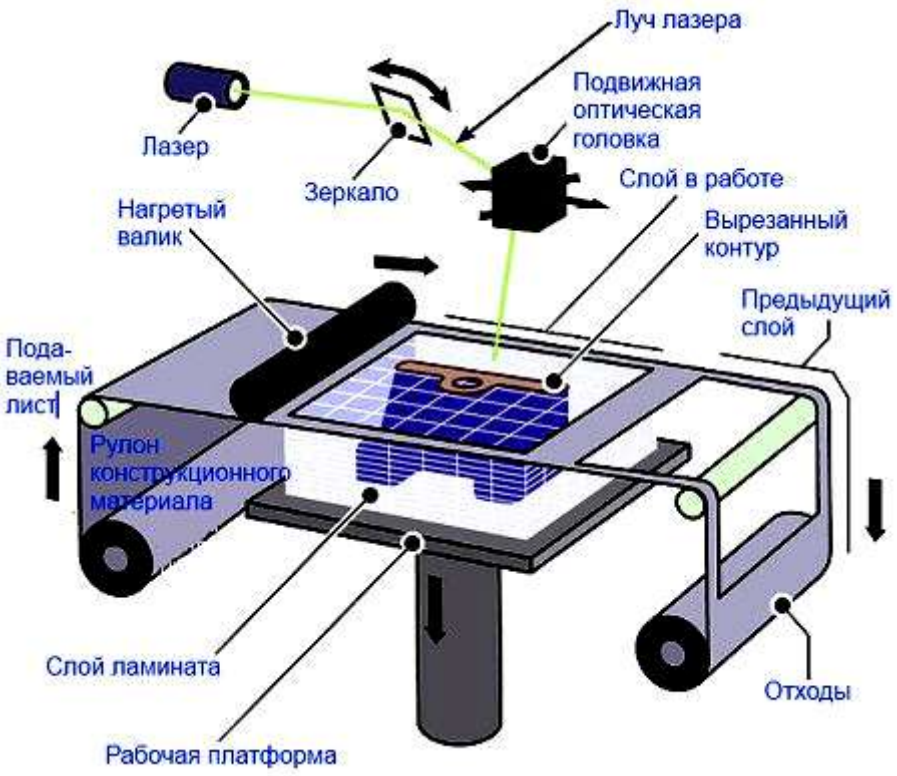


Рисунок 2.13 - Схема LOM-процесса

Рисунок 2.14 - LOM-3D-принтер Matrix 300+
Рабочая зона: 256×169×150 мм

2.8 Ultrasonic Additive Manufacturing

Сущность UAM-технологии: металлическая фольга послойно укладывается в стопку, слои соединяется друг с другом за счет ультразвуковой (УЗ) сварки с последующим вырезанием в каждом слое выкройки требуемой конфигурации с помощью режущего инструмента или лазерного луча и удалением излишков материала.

Таким образом, UAM-процесс реализуется по схеме «пакетирование-соединение-резка с ультразвуковой сваркой», отсюда его другое название – Stack-bond-cut-US-Weld-Sheet Lamination (SBC-US-Weld-SL).

На рис. 2.15 показана схема UAM-процесса.

Послойно укладываемая тонкая металлическая фольга подвергается обработке УЗ волноводом-инструментом, который прижимает верхний слой фольги к нижележащему слою. Одновременно волновод вибрирует с частотой 20 кГц перпендикулярно направлению движения. В результате обеспечивается УЗ сварка слоев фольги, которые удерживаются в определенном месте с помощью зажимного и натяжного механизмов. Каждый слой фольги подвергается контурному раскрою с помощью фрезы.

На рис. 2.16 показан внешний вид UAM-оборудования для УЗ сварки алюминиевой фольги (сварка осуществляется УЗ волноводом-инструментом в форме барабана, который прокатывается по верхнему слою фольги).

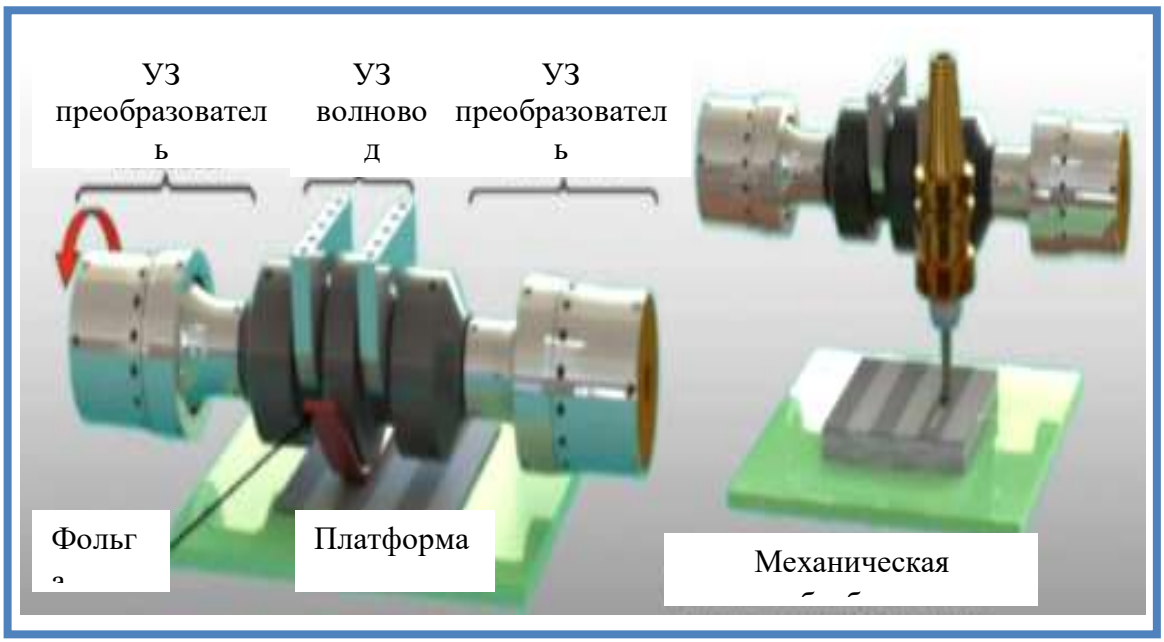


Рисунок 2.15 - СхемаUAM-процесса

2.9 Stack-cut-bond-SheetLamination

Сущность SCB-SL-технологии: металлические листы поочередно укладывают в стопку и вырезают из них лазером выкройки, которые соединяют друг с другом. По характеру соединения выкроек различают два варианта данной технологии: Stack-cut-bond-Solder-Sheet Lamination (Solder – «пайка») и Stack-cut-bond-D-Weld-Sheet Lamination (D-Weld = Diffusion Weld – «диффузионная сварка»).

Stack-cut-bond-Solder-Sheet Lamination, SCB-Solder-SL – металлические листы последовательно пакетируют и разрезают лазером, каждую полученную листовую выкройку покрывают слоем паяльной пасты, который выравнивают путем прокатки роликом, затем стопку выкроек сжимают нагретыми плитами, в результате чего между выкройками создается паяное соединение.

Схема SCB-Solder-SL-процесса показана на рис. 2.17.

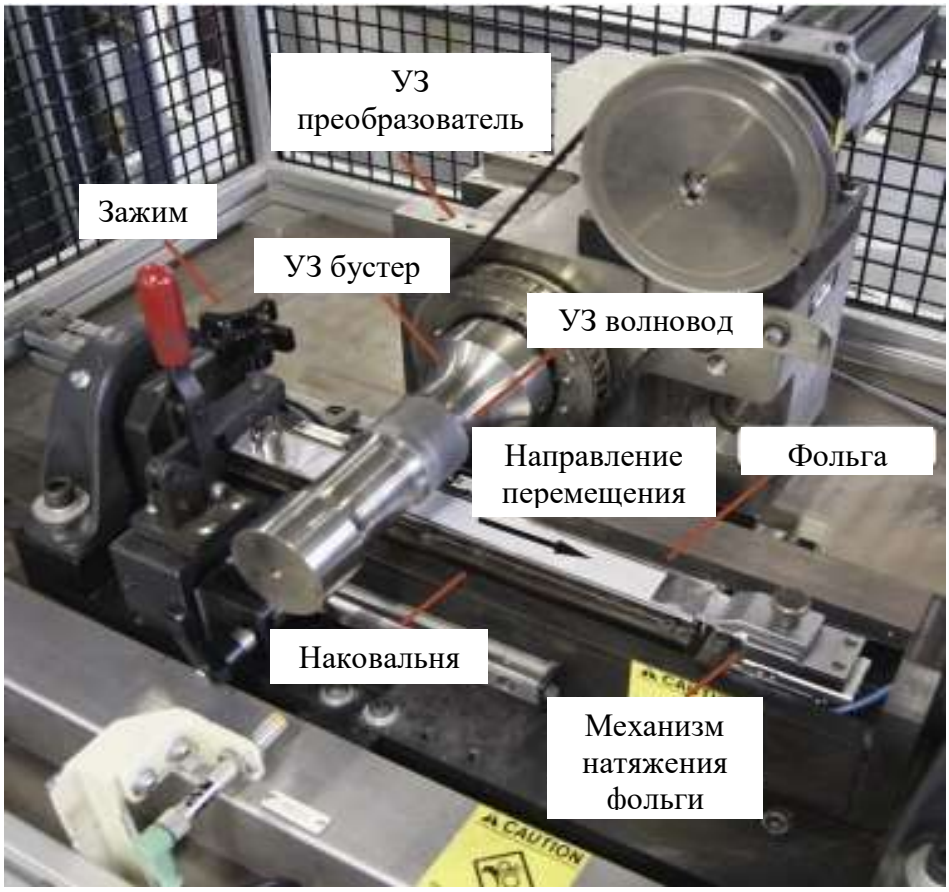


Рисунок 2.16 - Alpha 2 UAM-3D-принтер

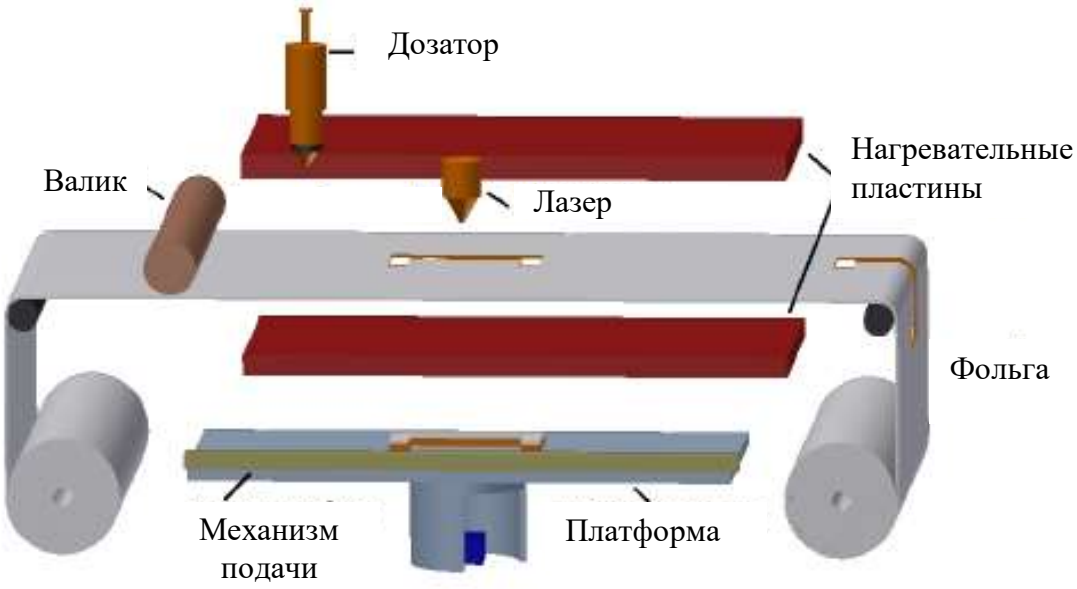


Рисунок 2.17 - Схема SCB-Solder-SL-процесса

Основными компонентами SCB-Solder-SL-3D-принтера являются механизм подачи, который продвигает металлический лист над рабочей платформой, лазер для вырезания контура детали в каждом слое листа,

дозатор, который распределяет паяльную пасту на металлические листы, валик, который разглаживает пасту до однородного слоя, нагревательные пластины для приложения давления и тепла для склеивания листов, покрытых паяльной пастой, друг с другом. Процесс можно разделить на два этапа, первый из которых включает резку и укладку слоев, а второй – соединение слоев для производства конечного продукта.

Stack-cut-bond-D-Weld-Sheet Lamination, SCB-D-Weld-SL – металлические листы поочередно пакетируют и разрезают лазером, полученные выкройки соединяют диффузионной сваркой, для чего стопку выкроек подвергают прессованию в печи.

Схема процесса диффузионной сварки стопки листовых заготовок показана на рис. 2.18.

Диффузионно-сварочное соединение пакетированных металлических листов происходит в результате их прессования при высокой температуре в течение определенного времени, достаточного для того, чтобы листы соединились по всей площади с полным закрытием всех микроскопических пор на границе раздела.

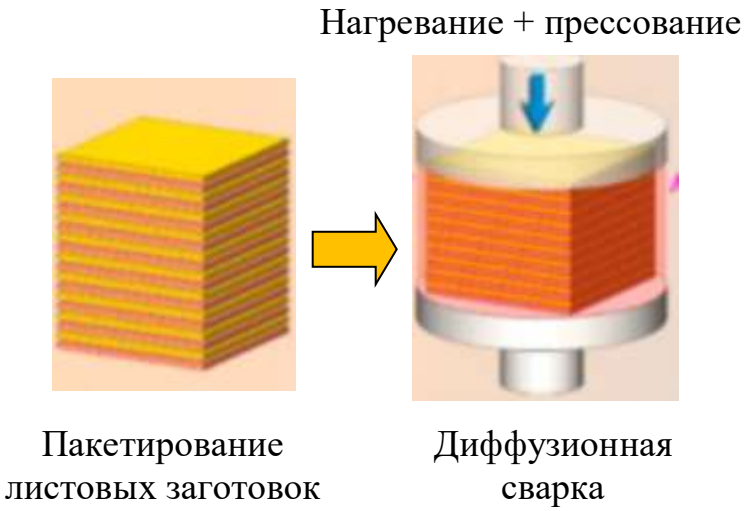


Рисунок 2.18 - Схема процесса диффузионной сварки

2.10 Cut-stack-bond-Sheet Lamination

Сущность CSB-SL-технологии: из листового строительного материала вырезаются выкройки требуемой конфигурации, которые последовательно укладываются в стопку и соединяются друг с другом.

Таким образом, в данном случае SL-процесс реализуется по схеме «резка-пакетирование-соединение» («cut-stack-bond») (рис. 2.19), что находит отражение в названии процесса. Для сравнения на рис. 2.20 показаны стадии реализации SL-процесса по выше рассмотренной схеме «пакетирование-соединение-резка» («stack-bond-cut»).

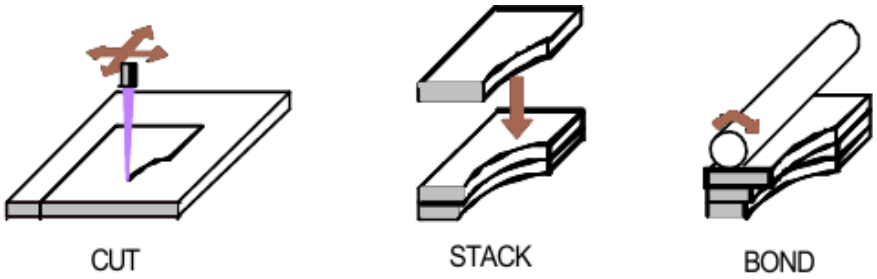


Рисунок 2.19 - Стадии реализации SL-процесса по CSB-схеме

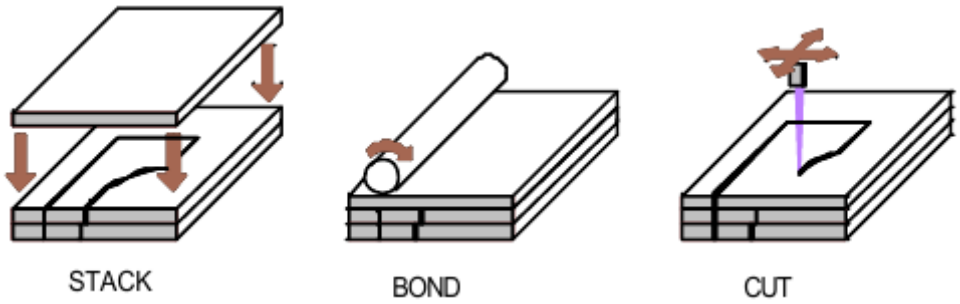


Рисунок. 2.20 - Стадии реализации SL-процесса по SBC-схеме

При построении по схеме CSB листы строительного материала обычно раскраивают в автоматизированном режиме с помощью серийно выпускаемых лазерных или фрезерных раскроечных станков (рис. 2.21 и 2.22).

Рисунок 2.21- Станок лазерной резки LaserCUT-3015-1
Раскройный стол: 1,5×3 м. Раскраиваемые листовые материалы: сталь, алюминиевые и медные сплавы

Последующее пакетирование полученных листовых выкроек и их соединение трудно поддаются автоматизации, поэтому обычно эти операции выполняют вручную. Во время пакетирования выкроек важно обеспечить их точное взаиморасположение в стопке, для чего в них делают, например, специальные фиксирующие отверстия, через которые проходят направляющие стержни. Возможны и другие способы фиксации положения укладываемых в стопку выкроек (с помощью выступов, прорезей, специальных приспособлений-упоров). Листы в стопке соединяют с помощью клея, пайкой, сваркой, также их можно стягивать болтами. Листы, используемые при построении изделий, в силу особенностей обращения с ними должны обладать определенной жесткостью, поэтому их толщина, как правило, значительно больше, чем у листовых строительных материалов, используемых в других вариантах SL-технологии – тонколистовой бумаги, полимерной пленки, металлической фольги и т.п.

Рисунок 2.22 - Фрезерный раскроечный станок SG1630
Раскройный стол: 1,55×3 м. Раскраиваемые листовые материалы: древесина, пластик, цветной металл.

2.11 Stereolithography Apparatus

Сущность SLA-технологии: последовательно наносимые слои жидкого фотополимера селективно отверждаются под действием излучения лазера, работающего в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне.

SLA-процесс осуществляется следующим образом. В залитый фотополимером бак погружается платформа, выполненная с возможностью вертикального перемещения. Платформа первоначально устанавливается так, чтобы над ней был сформирован слой жидкого фотополимера заданной толщины. Этот слой подвергается действию луча УФ-лазера, сканирующего поверхность слоя. При этом слой

селективно затвердевает, в результате чего создается первый слоистый элемент изделия. Затем платформа погружается в бак, так что над этим элементом образуется новый слой жидкого фотополимера, который также селективно затвердевает, и т.д. до полного построения изделия.

Сканирование лазерным лучом поверхность слоя жидкого фотополимера осуществляется путем отклонения луча призмами и/или зеркалами, которые приводятся в движение специальной автоматизированной системой. При этом луч построчно засвечивает те области слоя, которые должны быть отверждены (полимеризованы). Схема SLA-процесса показана на рис. 2.23, внешний вид SLA-3D-принтера – на рис. 2.24.

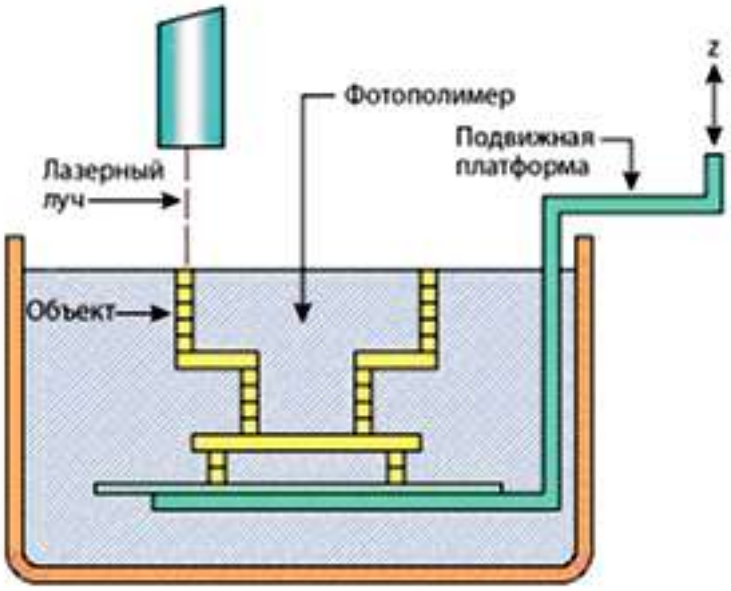


Рисунок 2.23 - Схема SLA-процесса

Рисунок 2.24 - SLA-3D-принтер Wiiboox 3DSL450

Рабочая зона: 459×450×300 мм

2.12 Digital Light Processing

Сущность DLP-технологии: процесс происходит по аналогии с SLA-процессом, отличие состоит в том, что слои жидкого фотополимера селективно затвердевают под действием не лазерного УФ луча, а потока УФ излучения, сформированного матрицей точечных источников света (цифровым светодиодным проектором).

Основным элементом проектора является цифровое микрозеркальное устройство (Digital Micromirror Device), представляющее собой матрицу из микроскопических зеркал, на которые падает поток света. Зеркала выполнены с возможностью программного изменения своей ориентации с помощью специальной микроэлектронной системы. Каждое зеркало можно переводить в одно из двух положений: в первом положении оно отражает попадающий на него световой поток, направляя его на линзу и далее на слой жидкого фотополимера, во втором положении – отклоняет световой поток в сторону от линзы (на светопоглотитель). В результате слаженного действия всей матрицы на слой жидкого фотополимера падает световая картинка определенной конфигурации, вызывая его селективное отверждение.

Итак, в отличие от SLA-3D-принтера, построчно сканирующего поверхность слоя лазерным лучом, DLP-3D-принтер проецирует световую картинку сразу же на всю поверхность слоя до селективного отверждения фотополимера, после чего формируется и селективно отверждается новый слой фотополимера.

Схема DLP-процесса показана на рис. 2.25, внешний вид 3DP-принтера – на рис. 2.26.

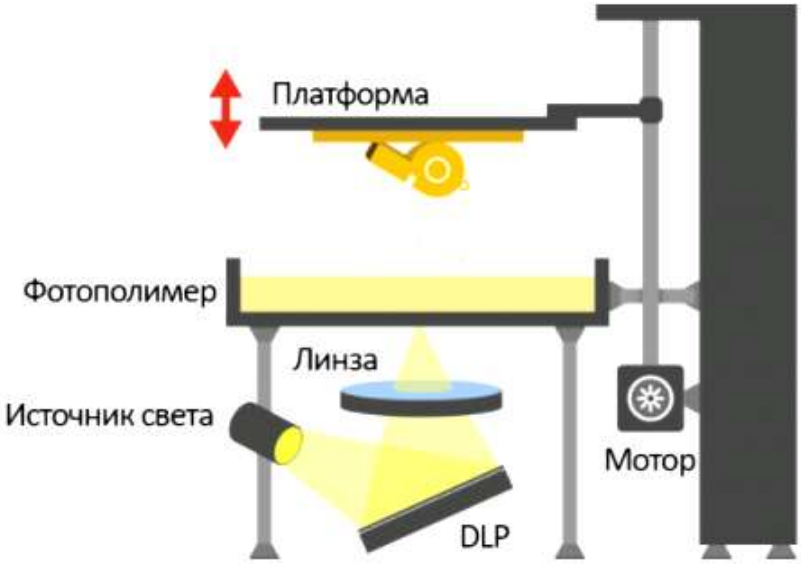


Рисунок 2.25 - Схема DLP-процесса

Рисунок 2.26 - DLP-3D-принтер DM250
Рабочая зона: 250×140×250 мм

2.13 Mask Projection Stereolithography

Сущность MPSL-технологии: процесс происходит по аналогии с SLA-процессом, отличие состоит в том, что слои жидкого фотополимера селективно затвердевают под действием не лазерного УФ луча, а потока УФ излучения, сформированного лампой и проходящего через маску (фотошаблон) соответствующего контура.

MPSL-процесс включает два цикла. Один цикл – маскирование: на стеклянную пластину наносится требуемый узор с помощью фотокопировальной системы, который удаляется после световой обработки. Другой цикл – построение изделия: отверждение слоя жидкого фотополимера под воздействием потока света, проходящего через маску. Далее циклы повторяются до завершения построения изделия.

Схема MPSL-процесса показана на рис. 2.27, внешний вид MPSL-3D-принтера – на рис. 2.28.

2.14 Selective Laser Sintering

Сущность SLS-технологии: последовательно наносимые слои порошка селективно спекаются лазером.

SLS-процесс осуществляется следующим образом. Специальный равняющий механизм подает порошок из камеры с расходным

строительным материалом в камеру построения изделия, формируя слой порошка заданной толщины. Этот слой подвергается селективному спеканию лазерным лучом, сканирующим поверхность слоя. Одновременно он спекается с нижележащим ранее спеченным слоем. Затем строительная платформа опускается вниз на шаг, равный толщине формируемого слоя. Все операции повторяются до тех пор, пока изделие не будет полностью построено.

Лазерному спеканию можно подвергать как однородные по составу порошки, так и порошковые смеси.

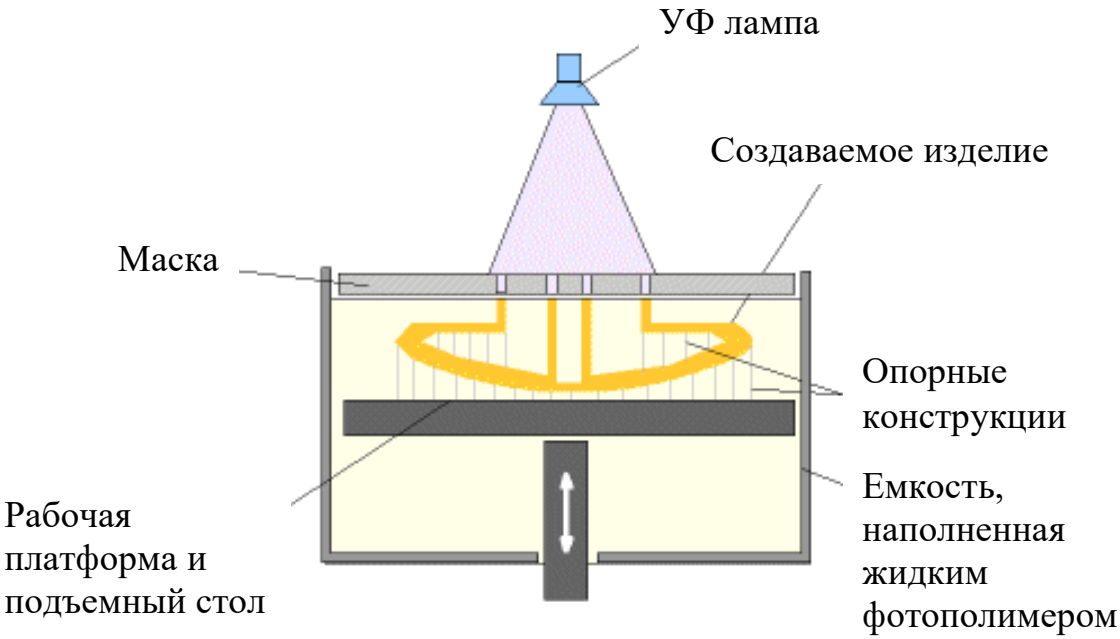


Рисунок 2.27 - Схема MPSL-процесса

Рисунок 2.28 - MPSL-3D-принтер3D Systems V-Flash FTI 230
Рабочая зона: 250×140×250 мм

При спекании однородного по составу порошка в результате лазерного нагрева обеспечивается поверхностное оплавление его частиц, при этом ядра частиц остаются твердыми. Благодаря пленке расплава, образовавшейся на поверхности, частицы связываются друг с другом. После прекращения действия лазерного луча расплав затвердевает и образуется монолитное спеченное тело.

На практике более широкое распространение получило лазерное спекание смесей двух порошков, имеющих разные температуры плавления. При этом легкоплавкие частицы полностью расплавляются, обволакивая тугоплавкие частицы, которые остаются твердыми. Данный вариант спекания технически более прост в осуществлении и позволяет получать более плотное спеченное тело. Вместо смеси двух порошков можно спекать плакированный порошок, состоящий из тугоплавких частиц, покрытых легкоплавкой оболочкой. В качестве строительных материалов используются порошки различных металлов, полимеров, стекла, кварцевый песок и т.п.

Схема SLS-процесса показана на рис. 2.29, внешний вид SLS-3D-принтера – на рис. 2.30.

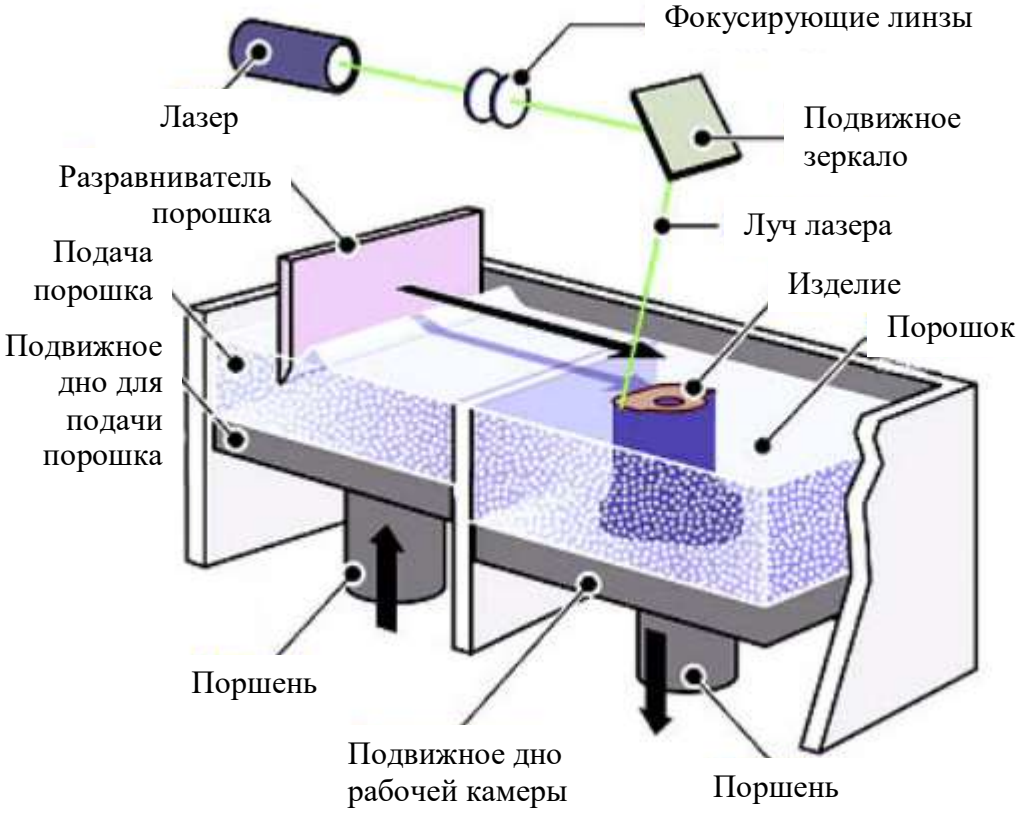


Рисунок 2.29 - Схема SLS-процесса

2.15 SelectiveLaserMelting

Сущность SLM-технологии: последовательно наносимые слои порошка селективно сплавляются лазером. SLM-процесс осуществляется по аналогии с SLS-процессом, особенность его состоит в том, что лазерной обработке подвергаются порошки металлов (сталей, цветных металлов и их сплавов), которые в результате лазерного нагрева не спекаются, а сплавляются (переплавляются).

Рисунок 2.30 - SLS-3D-принтер 3D Red Rock
Рабочая зона: 200×200×180 мм. Строительный материал: порошковый пластик

Важным условием осуществления SLM-процесса является создание защитной среды, предотвращающей окисление металлических порошков, для чего используют инертные газы аргон или азот.

Схема SLM-процесса показана на рис. 2.31, внешний вид SLM-3D-принтера – на рис. 2.32.

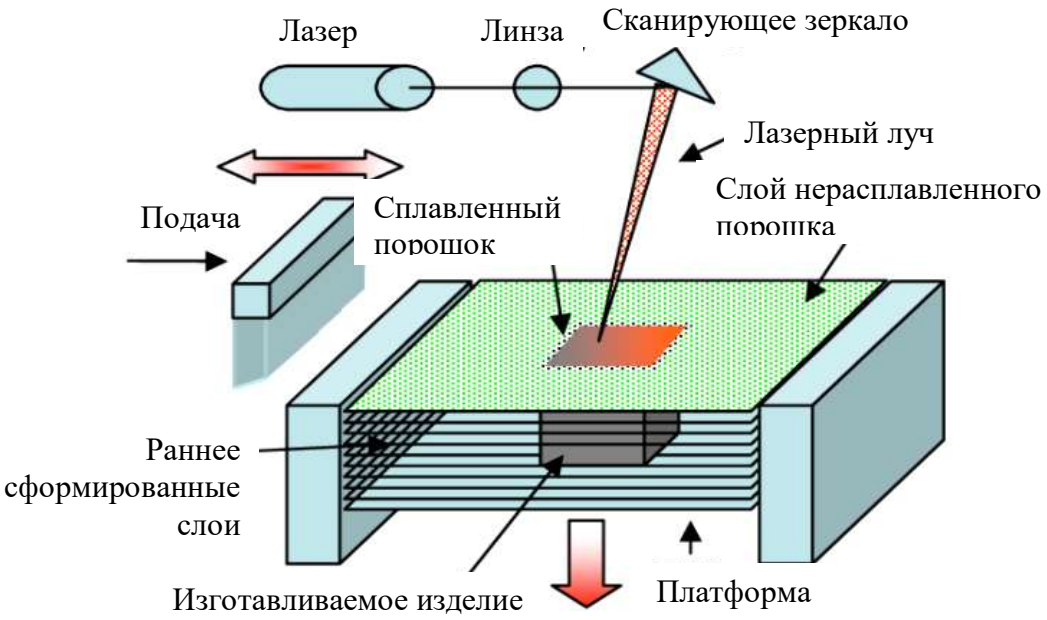


Рисунок 2.31- Схема SLM-процесса

Рисунок 2.32 - SLM-3D-принтер SLM 500
Рабочая зона: 500×280×365мм

2.16 Electron Beam Melting

Сущность EBM-технологии: процесс происходит по аналогии с SLM-процессом, отличие состоит в том, что слои металлического порошка плавятся не лазером, а электронным лучом.

Характерная способность EBM-процесса состоит в том, что его необходимо проводить в вакууме.

Схема EBM-процесса показана на рис. 2.33, внешний вид EBM-3D-принтера – на рис. 2.34.

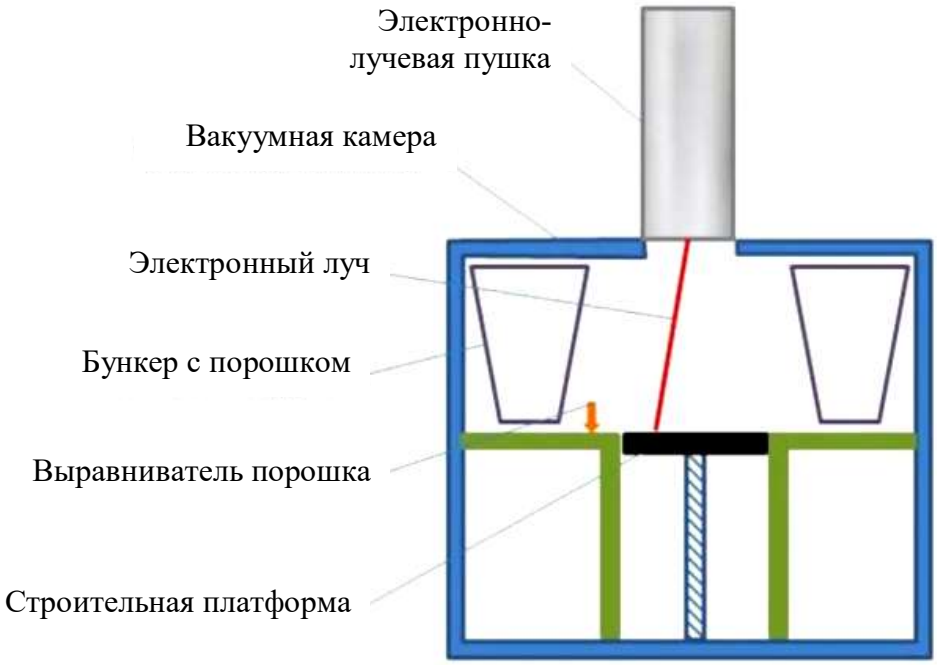


Рисунок 2.31 - Схема ЕВМ-процесса

Рисунок 2.34 - 3D-принтер Arcam EBM Q10plus
Рабочая зона: 200×200×180мм

2.17 Direct Laser Metal Deposition

Сущность DLMD-технологии: металлический порошок (или проволока) подается непосредственно в место построения изделия, где подвергается лазерной послойной наплавке.

Схема DLMD-процесса показана на рис. 2.35, внешний вид DLMD-3D-принтера – на рис. 2.36.

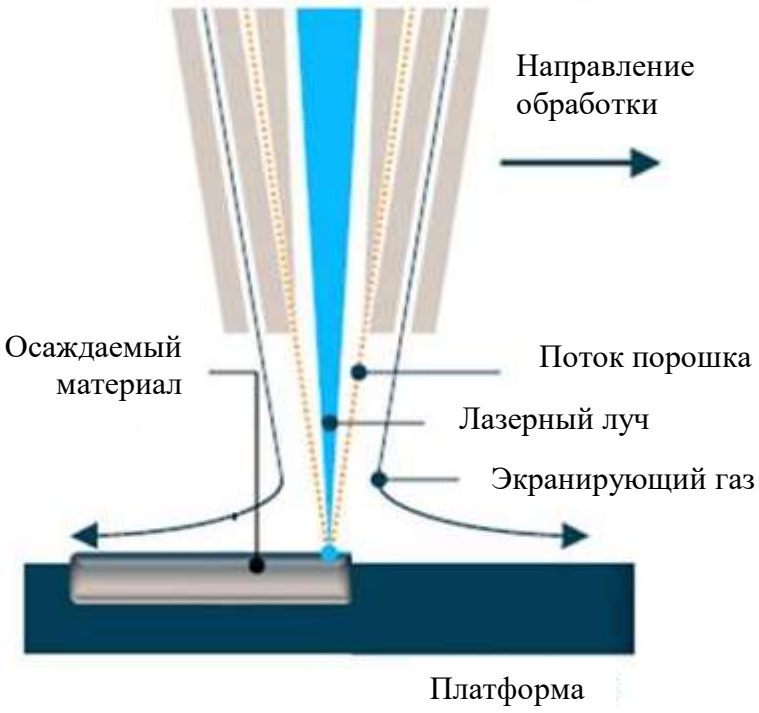


Рисунок 2.35 - Схема DLMD-процесса

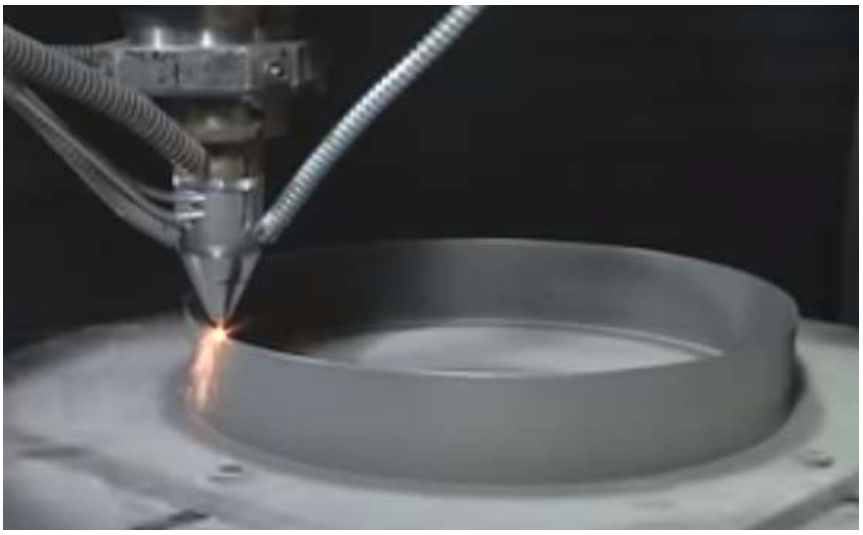


Рисунок 2.36 - DLMD-3D-принтер

По аналогии с DLMD-процессом осуществляется LENS-процесс, отличие его состоит в том, что в зону лазерной наплавки может подаваться не один вид, а два или более видов металлических порошков, в результате создаются изделия с градиентным составом.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит сущность технологии Fused Deposition Modeling?
2. В чем состоит сущность технологии Multiphase Jet Solidification?
3. В чем состоит сущность технологии Direct Ink Writing?
4. В чем состоит сущность технологии Inkjet Printing?
5. В чем состоит сущность технологии Three Dimensional Printing?
6. В чем состоит сущность технологии Laminated Object Manufacturing?
7. В чем состоит сущность технологии Ultrasonic Additive Manufacturing?
8. Чем различаются технологии Stack-cut-bond-Sheet Lamination и Cut-stack-bond-Sheet Lamination?
9. В чем состоит сущность технологии Stereolithography Apparatus?
10. Чем схожи и чем различаются технологии Digital Light Processing и Mask Projection Stereolithography?
11. Чем схожи и чем различаются технологии Selective Laser Sintering и Selective Laser Melting?
12. Чем схожи и чем различаются технологии Selective Laser Melting и Electron Beam Melting?
13. В чем состоит сущность технологии Direct Laser Metal Deposition?

3. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

3.1 Сравнительная оценка аддитивных и традиционных технологий

АМ-технологии по сравнению с традиционными технологиями имеют ряд достоинств, описанных ниже.

1. Высокая гибкость производства, высокая скорость освоения выпуска новых изделий.

Компьютерные 3D-модели будущих изделий, создаваемые в рамках реализации АМ-технологий, могут с помощью электронной почты быстро передаваться на подготовку к 3D-печати, а затем – в последующую 3D-печать, в том числе, при необходимости, они могут пересылаться на любые расстояния. Для этого не требуется иметь традиционные чертежи и натурные модели. Это означает, что специалисты, создающие компьютерные 3D-модели и готовящие их к 3D-печати, и операторы 3D-принтеров, изготавливающие изделия на основе этих моделей, могут находиться в любых точках мира, но, несмотря на это, обмен технической информацией между ними будет проводиться без задержек (практически мгновенно). Как следствие, время от компьютерного 3D-моделирования до запуска в производство будет существенно сокращаться.

При создании новых изделий аддитивные технологии позволяют исключать из производственного цикла традиционное проектирование, а вместо этого оперативно вносить корректировки в компьютерные 3D-модели проектируемых изделий и пересылать файлы с измененными проектными решениями по электронной почте для 3D-печати прототипов (экспериментальных образцов) изделий и их последующих испытаний.

Благодаря применению АМ-технологий можно получать практически готовые изделия, у которых либо совсем нет припусков на обработку, либо эти припуски минимальны, в том числе можно получать такие изделия, которые по своим характеристикам превосходит изделия, созданные с помощью традиционных технологий.

2. Большая свобода проектирования изделий.

АМ-технологии открывают путь к широкому использованию передовых методов проектирования, включая топологическую оптимизацию и биологический дизайн. Как следствие, становится возможным получать изделия такой конструкции, которая не может быть достигнута при их изготовлении иными способами, в том числе: создавать изделия сложной нестандартной формы; заменять сборку нескольких простых деталей одной более сложной деталью,

объединяющей в себе простые детали; формировать сетчатые и ячеистых структур взамен сплошных структур; обеспечивать функционально-градиентное распределение свойств материала изделия за счет изменения параметров процесса его аддитивного построения.

Например, АМ-технологии позволяют создавать в изделии внутренние извилистые каналы или закрытые конформные полости, чего невозможно достигнуть с помощью традиционных технологий, таких как литье, обработка резанием или давлением.

3. Низкая себестоимость производства единичных изделий (малых партий изделий).

Экономическая эффективность применения АМ-технологий в условиях единичного производства, особенно когда производимые изделия имеют сложную форму, обеспечивается за счет отсутствия необходимости специально создавать дорогостоящую формообразующую оснастку или осуществлять сложную механическую обработку, а также за счет малых отходов идущих на изготовление материалов (рис. 3.1).

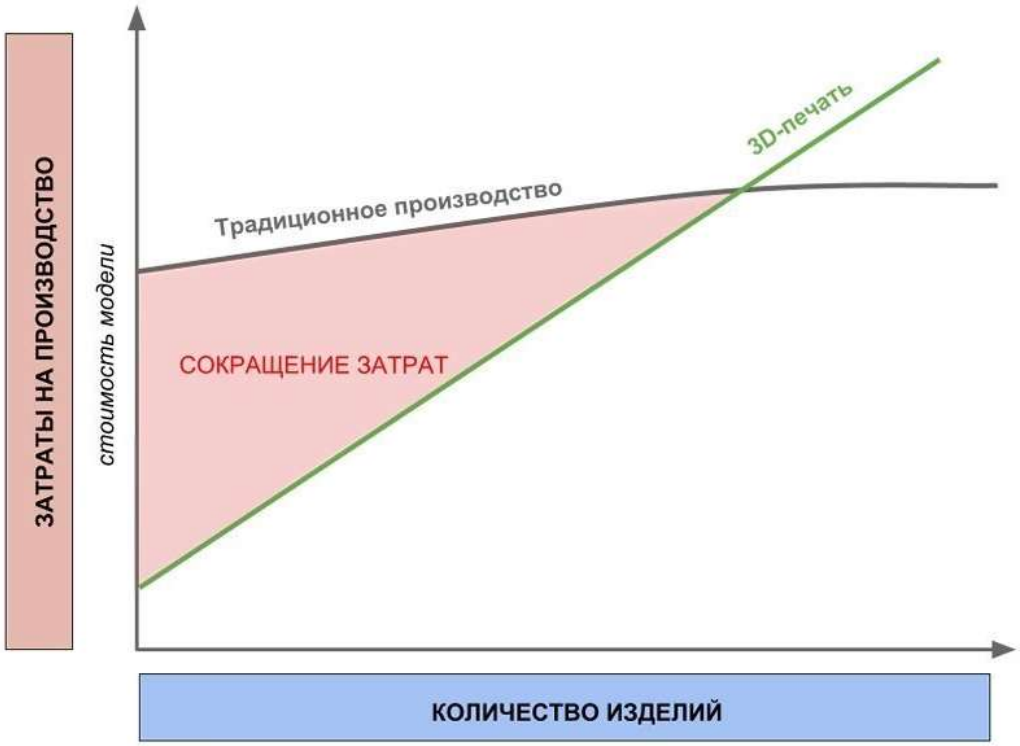


Рисунок 3.1 - Зависимость стоимости моделей изделия от количества образцов, произведенных по традиционным технологиям и АМ-технологиям

Об эффективности применения АМ-технологий можно судить по сравнительному рассмотрению разных схем реализации процесса литья, представленных на рис. 3.2.

Вместе с тем АМ-технологии обладают следующими недостатками, сдерживающими их широкое применение:

1) ограниченная номенклатура расходных материалов;

2) ограниченные размеры рабочей зоны АМ-оборудования (3D-принтеров), и, соответственно, ограниченные размеры изготавливаемых изделий

3) недостаточно высокая точность изготовления изделий, которая определяется точностью работы оборудования, а также некоторыми технологическими факторами (например, усадкой порошкового материала при спекании или сплавлении);

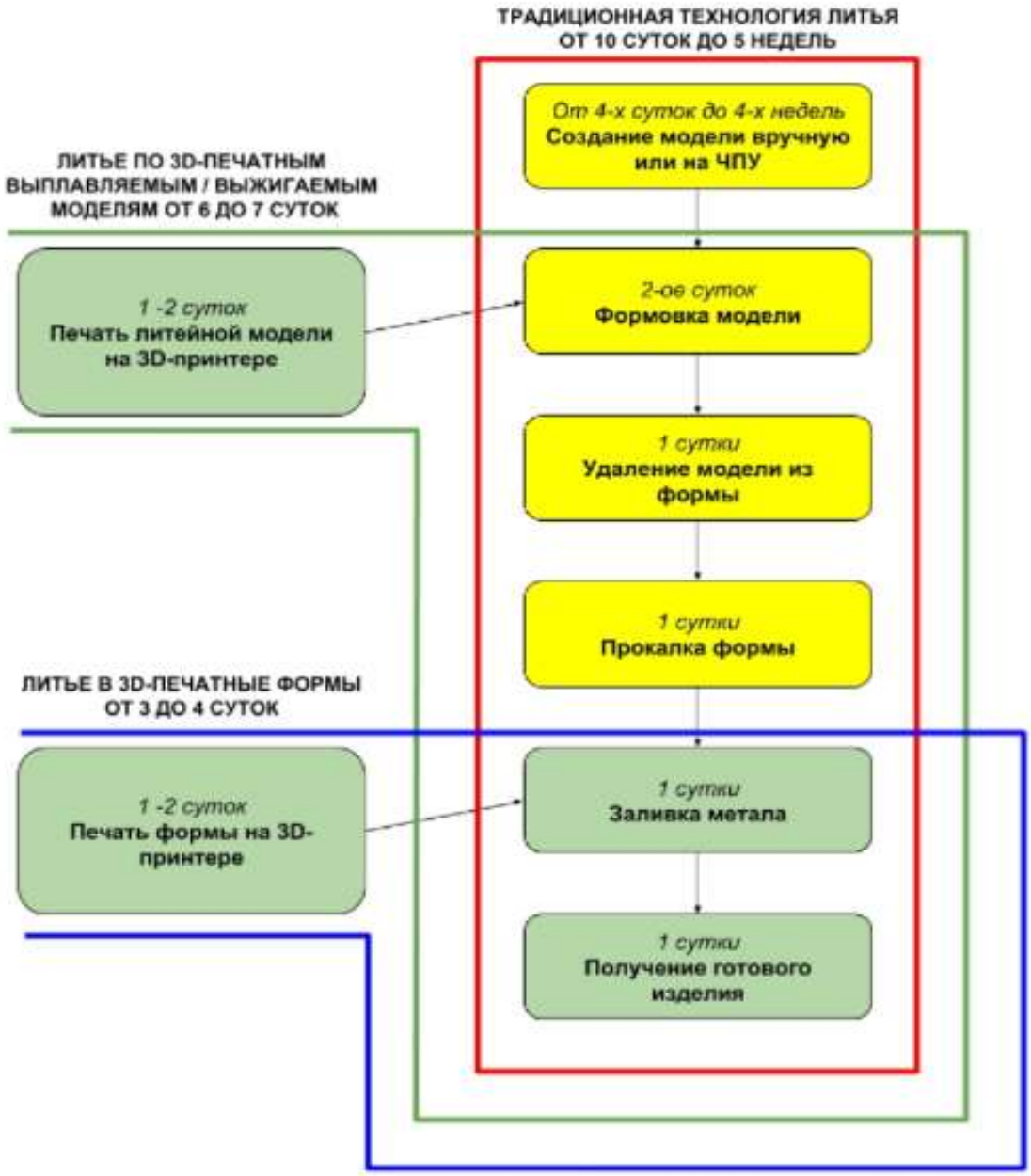


Рисунок 3.2 - Схемы реализации процесса литья для мелкосерийных и единичных производств

В красной области указан традиционный процесс литья, в зеленой и синей – процесс литья с применением АМ-технологий (сроки изготовления уменьшаются в 2-6 раз)

4) недостаточно низкая шероховатость поверхности изготовленных изделий, в частности, наличие ступенчатого рельефа поверхности, обусловленного послойным характером построения изделий;

5) необходимость в ряде случаев проводить последующую обработку (постобработку) изготовленных изделий, в том числе:

- термообработку для улучшения структуры и механических свойств материала изделий;
- удаление опорных (поддерживающих) структур;
- очистку изделий от остатков сырьевых материалов;
- устранение дефектов построения изделий;
- обработку поверхности изделий для достижения необходимой шероховатости, нанесения специальных покрытий;

6) высокая стоимость3D-принтеров и расходных материалов (для отдельных видов АМ-технологий); неконкурентная стоимость продукции при больших объемах выпуска.

К факторам, сдерживающим широкое применение АМ-технологий, относятся не только присущие им недостатки, рассмотренные выше, но также:

- отсутствие нормативных документов (стандартов), регламентирующих деятельность производственных предприятий, осваивающих АМ-технологии;
- отсутствие высококвалифицированных специалистов, способных эффективно производить и эксплуатировать 3D-принтеры;
- консерватизм руководства производственных предприятий, их низкая инновационная восприимчивость, неготовность к освоению АМ-технологий.

Причины консервативного отношения к АМ-технологиям обусловлены тем, что распространение АМ-технологий в производственной сфере неизбежно связано со сменой производственных парадигм (моделей организации производственной деятельности), а именно с переходом от производства крупными сериями однотипной продукции и ее поставке на рынки, соответственно, крупными партиями к персонализированному производству и доставке потребителям, соответственно, кастомизированной (выполненной по индивидуальным заказам) продукции.

Примером тому является применение АМ-технологий для производства запасных деталей, используемых при выполнении ремонтных работ. Так, изготовление на 3D-принтере запасных деталей по запросу может в значительной мере изменить сферу

послепродажного обслуживания, когда на место крупных региональных складов запчастей придут небольшие мастерские 3D-печати, оснащенные оборудованные, необходимым для производства запасных деталей.

3.2 Сравнительная оценка разных видов аддитивных технологий

АМ-технологии разных видов имеют свои особенности и, соответственно, свои достоинства и недостатки, которые следует учитывать при выборе наиболее приемлемой АМ-технологии изготовления изделий (табл. 3.1).

Таблица 3.1 - Достоинства и недостатки разных видов АМ-технологий

Достоинства	Недостатки
FDM	
Высокая точность и скорость, низкая стоимость, техническая простота реализации печати; широкий спектр строительных термопластиков	Расплавленные термопластичные волокна при послойной укладке сплющиваются, так что поверхность изделий приобретает рельеф, для сглаживания которого приходится применять постобработку; необходимость создавать поддерживающие элементы для построения изделий с нависающими частями
MJM	
Малая толщина наносимого слоя; высокое разрешение печати; возможность сочетания строительных материалов с разными свойствами	Необходимость создавать поддерживающие элементы для построения изделий с нависающими частями
3DP	
Низкая стоимость, техническая простота реализации печати без необходимости создавать поддерживающие элементы; широкий спектр строительных порошковых материалов	Большая шероховатость поверхности; напечатанный материал нуждается в постобработке (спекании) для снижения шероховатости, повышения плотности и прочности
LOM	
Возможность печати крупногабаритных изделий без необходимости создавать поддерживающие элементы; высокая производительность печати за счет укладки готовых слоев изделия; широкий спектр легкодоступных недорогих строительных листовых материалов	Низкая точность изготовления изделий и качество поверхности (выраженный ступенчатый рельеф, для сглаживания которого приходится применять постобработку)
SLA	
Высокая точность печати; малая	Узкий спектр дорогостоящих (часто

толщина наносимого слоя; высокое разрешение печати; возможность изготовления тонкостенных изделий	токсичных) исходных строительных материалов (жидких фотополимеров); необходимость создавать поддерживающие элементы для построения изделий с нависающими частями; необходимость рекуперации либо утилизации отработанных материалов (полимеров и растворителей)
SLS	
Возможность печати без необходимости создавать поддерживающие элементы; широкий спектр строительных порошковых материалов	Напечатанные изделия имеют пористую структуру и большую шероховатость поверхности, поэтому обычно требуют постобработки
SLM / LENS	
Возможность печати без необходимости создавать поддерживающие элементы	Высокая стоимость строительных материалов (металлических порошков); необходимость осуществлять печать в защитной газовой среде

3.3 Гибридные аддитивные технологии

АМ-технологии не могут полностью заменить традиционные технологии изготовления или ремонта изделий, часто и те, и другие технологии применяются совместно, дополняя друг друга. Поскольку и те, и другие технологии могут иметь как достоинства, так и недостатки, то при их совместном применении ставится задача достигнуть наибольшего эффекта изготовления или ремонта изделий за счет максимального выделения достоинств и исключения недостатков этих технологий.

Сочетания АМ-технологий и традиционных технологий в рамках единого цикла изготовления изделий обозначают термином «гибридные АМ-технологии» («комбинированные АМ-технологии»). Также используется термин «аддитивно-субтрактивные технологии», чтобы подчеркнуть принципиальное различие в особенностях реализации этих технологий.

Существуют разные виды гибридных АМ-технологий, которые представляют собой:

- сочетание АМ-технологий изготовления прототипов и традиционных технологий изготовления изделий;
- сочетание АМ-технологий и традиционных технологий изготовления изделий;
- сочетание АМ-технологий изготовления изделий и традиционных технологий постобработки;

- сочетание АМ-технологий изготовления оснастки или инструмента и традиционных технологий изготовления изделий.

Как особый вид гибридных АМ-технологий можно рассматривать сочетание разных АМ-технологий изготовления изделий.

Перечисленные выше разновидности гибридных АМ-технологий характеризуются определенными особенностями сочетаний АМ-технологий и традиционных технологий и, соответственно, различной ролью, которую играют АМ-технологии при изготовлении изделий в каждом таком сочетании.

В общем случае все АМ-технологии, применяемые для изготовления изделий, делятся на технологии прямого и непрямого изготовления.

АМ-технологии прямого изготовления обеспечивают получение готового изделия непосредственно в результате своей реализации. При этом допускается применение АМ-технологий прямого изготовления в сочетании с традиционными технологиями изготовления, когда без них невозможно полностью изготовить изделие, либо в сочетании с традиционными технологиями постобработки, когда необходимо устранить специфические недостатки аддитивного изготовления изделий, обусловленные послойным характером их построения.

В свою очередь, АМ-технологии непрямого изготовления не позволяют непосредственно получать готовое изделие. Они, применяясь в сочетании с традиционными технологиями, служат для создания прототипов изделий, а также формообразующей оснастки или обрабатывающего инструмента, с помощью которых затем получают готовое изделие, используя традиционные технологии.

Особенности разных видов гибридных АМ-технологий рассмотрены в последующих разделах: сочетания АМ-технологий изготовления прототипов и традиционных технологий изготовления изделий – в разделе 5; сочетания АМ-технологий и традиционных технологий изготовления изделий, сочетания АМ-технологий изготовления изделий и традиционных технологий постобработки, а также сочетания разных АМ-технологий изготовления изделий – в разделе 6; сочетания АМ-технологий изготовления оснастки или инструмента и традиционных технологий изготовления изделий – в разделе 7.

По аналогии с гибридными АМ-технологиями изготовления изделий применяют гибридные АМ-технологии их ремонта, представляющие собой сочетания АМ-технологий ремонта (восстановления) деталей и традиционных технологий постобработки. Особенности гибридных АМ-технологий такого вида рассмотрены в разделе 8.

Контрольные вопросы

1. Перечислите достоинства аддитивных технологий по сравнению с традиционными технологиями.
2. Перечислите недостатки аддитивных технологий по сравнению с традиционными технологиями.
3. Чем обусловлена высокая гибкость производства при использовании аддитивных технологий?
4. Чем обусловлена высокая скорость освоения выпуска новых изделий при использовании аддитивных технологий?
5. Чем обусловлена большая свобода проектирования изделий при использовании аддитивных технологий?
6. Чем обусловлена низкая себестоимость производства единичных изделий при использовании аддитивных технологий?
7. Назовите основные виды постобработки, выполняемой при осуществлении аддитивных технологий.
8. Назовите достоинства и недостатки FDM-технологии.
9. Назовите достоинства и недостатки MJM-технологии.
10. Назовите достоинства и недостатки 3DP-технологии.
11. Назовите достоинства и недостатки LOM-технологии.
12. Назовите достоинства и недостатки SLA-технологии.
13. Назовите достоинства и недостатки SLS-технологии.
14. Назовите достоинства и недостатки SLM-технологии.
15. Что представляют собой гибридные аддитивные технологии?
16. Назовите виды гибридных аддитивных технологий.

4. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

4.1 Факторы и особенности применения аддитивных технологий

Сферы и масштабы применения АМ-технологий определяются рядом факторов.

К таким факторам относятся, прежде всего, строительные материалы, служащие для построения изделий в разных видах АМ-технологий. Структура этих материалов весьма неоднородна.

Наибольшее использование имеют термопластики, что объясняется, прежде всего, массовым распространением сравнительно дешевых FDM-3D-принтеров (стоимость профессиональных моделей составляет 5-30 тыс. долл. США, любительских – в пределах 1-2 тыс. долл. США), а также предназначаемых для них полимерных волокон (15-20 долл. США за 1 кг).

В последние годы наблюдается рост использования металлов, несмотря на то, что «металлические» 3D-принтеры стоят очень дорого, как, впрочем, и выпускаемые для их работы металлические порошки и проволоки. Так, стоимость SLM-3D-принтеров составляет от 500 тыс. до 1 млн долл. США и более, а предназначаемых для них порошков нержавеющих сталей – 300, сплавов Инконель – 400, титановых сплавов – 500. долл. США за 1 кг. Менее распространенными строительными материалами являются фотополимерные смолы, песчаник, воск, керамика и др. Также к факторам, определяющим применение АМ-технологий, относятся технические характеристики 3D-принтеров, от которых зависят производительность и качество изготовления изделий.

АМ-технологии получили распространение, прежде всего, в разных производственных отраслях. В начале их применения (в 1980-е годы) основной акцент делался на решение задач прототипирования. Со временем АМ-технологий, по мере своего совершенствования, расширения материалов спектра для 3D-печати и снижения стоимости 3D-печати, стали применяться в более широком диапазоне решаемых задач. Сегодня основными направлениями их применения в производственной сфере, кроме изготовления прототипов, являются изготовление функциональных изделий, формообразующей (прежде всего литейной) оснастки, образцов для визуализации концепции будущих изделий. Важно отметить, что АМ-технологии применяются для изготовления функциональных изделий гораздо шире, чем для изготовления прототипов. Это свидетельствует о том, что они перестали играть вспомогательную роль в производственных процессах и начинают составлять их основу.

АМ-технологии также все шире вторгаются в разные области общественную жизнь, в основном в медицину.

Современная структура рынка АМ-технологий представлена на рис. 4.1.

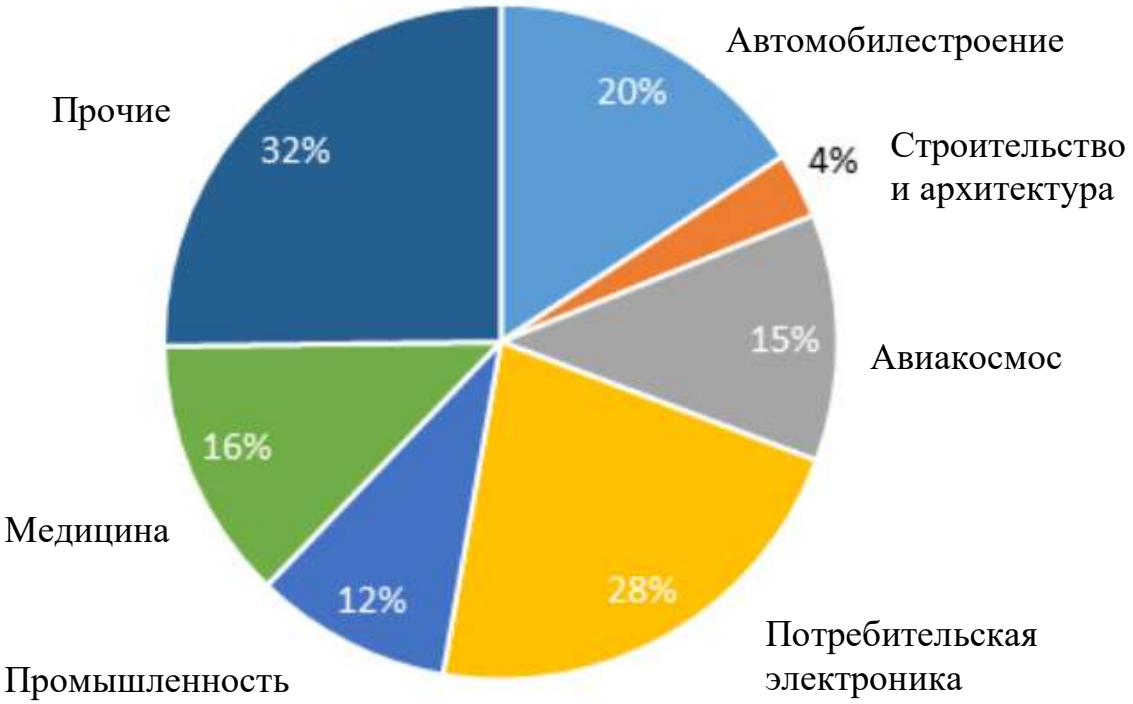


Рисунок 4.1 - Структура рынка АМ-технологий по направлениям применения

4.2 Аддитивные технологии в производственной сфере

Машиностроение (рис. 4.2)

Применение АМ-технологий в машиностроении идет по следующим направлениям:

1) быстрое создание прототипов на стадии разработки новых деталей и узлов машин;

2) создание конечных функциональных деталей сложной формы;

3) создание формообразующих элементов технологической оснастки для изготовления деталей по традиционным технологиям (в частности, создается литейная оснастка – пресс-формы для литья пластиков, мастер-модели для литья металлов по выплавляемым и выжигаемым моделям, песчано-глинистые форы для литья металлов, а также штамповая оснастка);

4) создание инструментов для изготовления деталей по традиционным технологиям (в частности, создаются режущие инструменты, электроды-инструменты).

Поскольку большинство деталей машин являются металлическими, то особый интерес представляет применение АМ-технологий, позволяющих получать детали напрямую из металла (Powder Bed Fusion, Directed energy deposition). Однако, поскольку для реализации таких технологий требуются весьма дорогостоящие 3D-принтеры и строительные материалы, то они находят применение, прежде всего, в авиакосмической промышленности, где часто приходится изготавливать детали сложной формы (газотурбинные лопатки, форсунки, камеры сгорания) в условиях мелкосерийного производства, поэтому избавление от оснастки при их изготовлении дает существенные выгоды. АМ-технологии также применяются в автомобилестроении, в других машиностроительных отраслях для изготовления деталей как из металлов, так и из пластмасс. Все более заметной становится роль АМ-технологий в ремонтном производстве, с их помощью изготавливают запасные детали, что особенно эффективно при внеплановых ремонтах машин, а также восстанавливают поломанные или изношенные детали.

Рисунок 4.2 - АМ-технологии в машиностроении

Электроника (рис. 4.3)

Для производства изделий электроники применяют 3D-печать полимерными и электропроводящими композиционными материалами (Material Extrusion, Material Jetting, Binder Jetting, Sheet Lamination). АМ-технологии позволяют создавать полнофункциональную электронику, практически не требующую сборки. С помощью 3D-принтеров изготавливают готовые изделия электроники или их элементы (датчики, платы, корпуса, клавиатуры), концепт-модели (для оценки внешнего

вида изделий) и тестовые прототипы (для проверки функциональности изделий).

Строительство и архитектура (рис. 4.4)

При строительстве зданий применяются 3D-принтеры, имеющие экструдер, через сопло которого выдавливается быстротвердеющая бетонная смесь (Material Extrusion). При этом для возведения стен не требуется опалубка. Таким способом можно построить за 24 часа жилой дом площадью 150 м^2. В архитектуре с помощью 3D-печати (Material Extrusion, Material Jetting, Binder Jetting, Sheet Lamination) создают объёмные макеты зданий и архитектурных ансамблей, например, жилых микрорайонов со всей инфраструктурой – скверами, парками, дорогами и т.п.

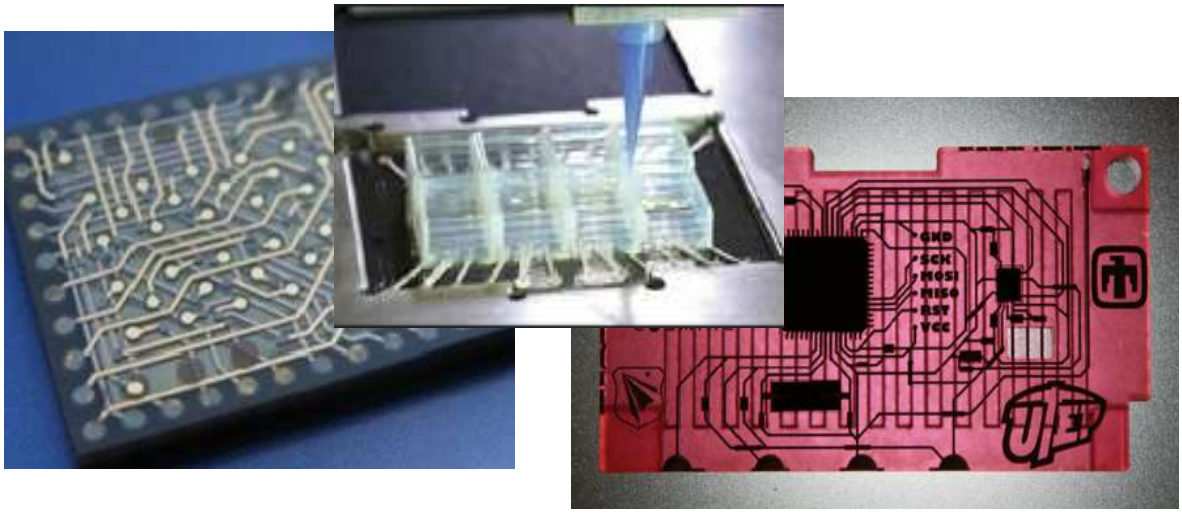


Рисунок 4.3 - АМ-технологии в электронике

Рисунок 4.4 - АМ-технологии в электронике

Легкая промышленность (рис. 4.5)

С применением АМ-технологий (Material Extrusion, Binder Jetting, Powder Bed Fusion) создают спортивную и терапевтическую обувь из пластиков по индивидуальным меркам для каждого заказчика (с учетом размеров и формы стопы), которая уменьшает усталость при увеличенных и длительных нагрузках на ноги, уменьшит риск развития плоскостопия. Путем 3D-печати изготавливают обувные колодки, подошвы, каблуки, стельки, а также целиком обувь. Особая область применения АМ-технологий – создание экстраординарных по форме образцов обуви и одежды высокой моды.

Индустрия питания (рис. 4.6)

Применение АМ-технологий (Material Extrusion, Material Jetting) при приготовлении пищевых блюд направлено на повышение их покупательского спроса за счет придания им особых объемных форм. В качестве материала для 3D-печати служат различные пищевые субстанции: шоколад, сахар, какао-порошок, тесто, сыр, мясные фарши, гидрогели из растений, соусы, кремы, сливочное масло и т.д. Наибольшее распространение получила 3D-печать для получения кондитерских изделий в скульптурном исполнении.

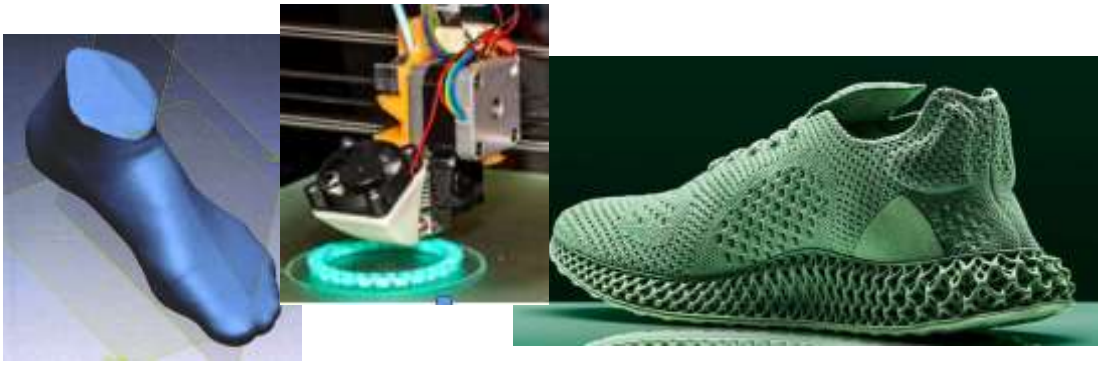


Рисунок 4.5 - АМ-технологии в легкой промышленности

Рисунок 4.6 - АМ-технологии в индустрии питания

Производство сувенирной продукции (рис. 4.7)

Изготовление сувениров – одно из самых популярных направлений коммерческой 3D-печати (Material Extrusion, Material Jetting, Vat Photopolymerization). АМ-технологии позволяют получать визуально разнообразные привлекательные объекты: мини-копии реальных людей (звезд музыки, спорта, кино), фигурки персонажей компьютерных игр, статуэтки, макеты домов, аксессуары для смартфонов (чехлы, подставки), дизайнерские украшения (запонки, брелоки, тематическая бижутерия), оригинальные предметы интерьера, награды для торжественных мероприятий, уникальные кубки для спортсменов и др.

Производство 3D-принтеров как продукции массового спроса

Многие компании, производящие 3D-принтеры, популяризуют АМ-технологии с целью привлечения к ним массового пользователя. Все больше людей начинает увлекаться моделированием с применением3D-печати и, соответственно, приобретать 3D-принтеры в личное пользование для удовлетворения своих творческих интересов. С учетом этого компания Microsoft еще в 2013 г. выпустила программу 3D-Builder, позволяющую просматривать, создавать и выводить на печать 3D-модели в комплекте с большой библиотекой готовых объектов: от деталей машин до детских игрушек.

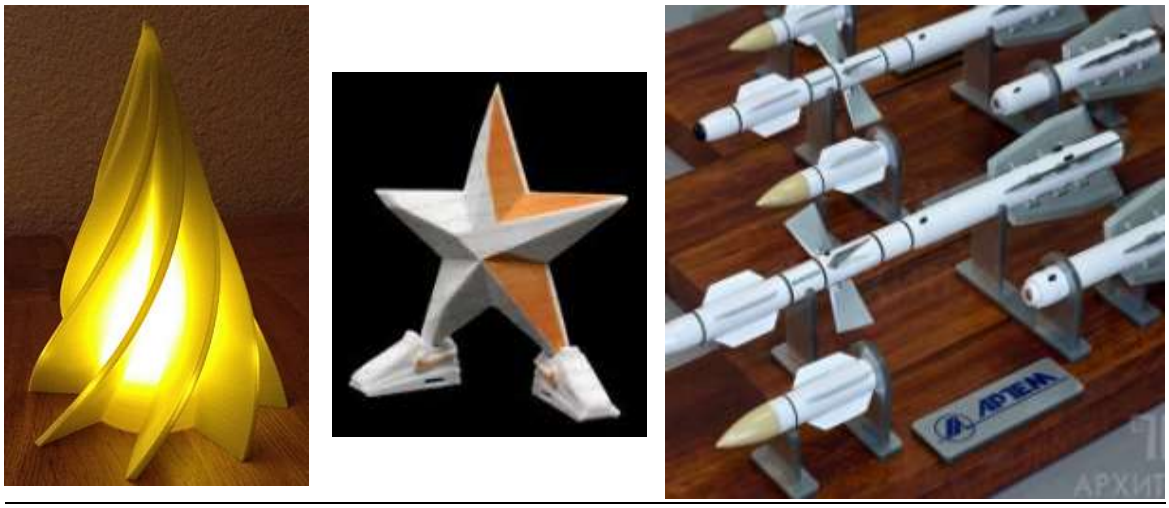


Рисунок. 4.7 - АМ-технологии в производстве сувенирной продукции

4.3 Аддитивные технологии в социальной сфере

Медицина (рис. 4.8)

С применением АМ-технологий изготавливают протезы и имплантаты (зубные коронки, каркасы бюгельных протезов, хирургические шаблоны для имплантации, позвоночные имплантаты, протезы конечностей, индивидуальные ушные вкладыши для слуховых аппаратов), а также точные анатомические модели, основанные на

компьютерной и магнитно-резонансной томографии, которые используются при планировании хирургических операций. В последние годы разрабатываются 3D-биопринтеры, способные создавать объемные структуры биологических тканей путем послойного размещения живых клеток на биосовместимой основе. С их помощью можно восстанавливать поврежденные ткани и органы человеческого тела.

Образование (рис. 4.9)

С развитием АМ-технологий возрастает потребность в специалистах для предприятий, которые разрабатывают и/или применяют эти технологии. В последние годы подготовку таких специалистов начинает проводить все большее число университетов и колледжей, в которых создаются учебные лаборатории 3D-печати (обычно их оснащают недорогими FDM-3D-принтерами). Использование 3D-печати в учебном процессе способствует улучшению качества подготовки специалистов в самых разных областях, например, в машиностроении (создание 3D-моделей деталей машин), архитектуре и строительстве (создание 3D-макетов архитектурных ландшафтов и строительных сооружений), географии (создание 3D-макетов географических ландшафтов), медицине (создание 3D-моделей частей человеческого тела при анатомическом моделировании, хирургическом планировании, протезировании), химии и биологии (создание 3D-моделей молекул, в частности, цепочек ДНК). Следует особо отметить положительный опыт применения АМ-технологий на учебных занятиях в школах, а также в кружках детского технического творчества.

Рисунок 4.8 - АМ-технологии в медицине

Рисунок 4.9 - АМ-технологии в образовании

Искусство (рис. 4.10)

АМ-технологии пользуются особой популярностью у художников и скульпторов, которые с помощью FDM-3D-принтеров создают скульптуры и диорамы из пластика, а также изделия художественной керамики, например, керамические вазы необычной, футуристической формы (экструзионная 3D-печать глиной).

Рисунок 4.10 - АМ-технологии в искусстве

Контрольные вопросы

1. Какими факторами определяются сферы и масштабы применения аддитивных технологий?
2. Назовите секторы производственной и социальной сферы, где аддитивные технологии получили наибольшее применение.
3. Назовите основные направления применения аддитивных технологий в машиностроении.
4. Назовите основные направления применения аддитивных технологий в электронике.
5. Назовите основные направления применения аддитивных технологий в строительстве.
6. Назовите основные направления применения аддитивных технологий в легкой промышленности.
7. Назовите основные направления применения аддитивных технологий в индустрии питания.
8. Назовите основные направления применения аддитивных технологий в производстве сувениров.
9. Назовите основные направления применения аддитивных технологий в медицине.
10. Что такое 3D-биопринтеры и где их применяют?
11. Приведите примеры применения аддитивных технологий при преподавании разных учебных дисциплин.
12. Назовите основные направления применения аддитивных технологий в искусстве.

5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

5.1 Методы проектирования деталей для аддитивного производства

Конструкция проектируемых деталей машин должна наиболее полно обеспечивать их использование в соответствии с заданным функциональным назначением. Однако при проектировании на нее приходится накладывать различные ограничения, обусловленные особенностями применяемых технологий их изготовления. Обычно такие ограничения устанавливаются при технологическом согласовании разрабатываемой конструкции, когда определяются технологические возможности изготовления деталей, а также их технологичность, т.е. затраты, связанные с их изготовлением.

Чем больше технологических ограничений накладывается на конструкцию детали, тем меньше эффективность ее функционирования. Как правило, эти ограничения являются довольно существенными в случае изготовления деталей с помощью традиционных технологий металлообработки или литья.

АМ-технологии, получающие в последние годы все большее распространение в машиностроении, не только снимают значительную часть ограничений на конструкцию проектируемых деталей, обусловленных традиционными технологиями, но также открывают принципиально новые возможности проектирования.

АМ-технологиипозволяют изготавливать изделия, конструкция которых характеризуется сложной геометрии – такой, какую трудно или невозможно обеспечить с помощью традиционных технологий. Соответственно, благодаря использованию АМ-технологий создаются предпосылки для существенного увеличения числа степенейсвободы в проектировании изделий, в частности, становится возможным применять различные методы проектирования, позволяющие максимально адаптировать конструкцию и, следовательно, функциональные свойства изделий под конкретные запросы потребителей.

Вместе с тем АМ-технологии способны накладывать свои, присущие им ограничения на конструкцию проектируемых деталей.

Известны различные методологические подходы к проектированию деталей машин, из них наиболее распространенными являются генеративное проектирование, топологическая оптимизация и бионическое проектирование (биопроектирование). В последние годы эти подходы начали получать все большее применение в

машиностроении в связи с развитием АМ-технологий, однако до сих пор они не имеют однозначного толкования.

В частности, нет единого, общепринятого понимания соотношения между генеративным проектированием и топологической оптимизацией. Иногда эти термины ошибочно рассматриваются как тождественные, взаимозаменяемые либо, наоборот, как полностью различные, не связанные друг с другом. В действительности же они имеют как общие, так и отличительные черты.

Общими для генеративного проектирования и топологической оптимизации являются цели проектирования, связанные с улучшением конкретных функциональных свойств проектируемых изделий. При проектировании деталей машин обычно ставится цель снизить массу деталей при сохранении требований, предъявляемых к их прочностным свойствам. Снижение массы деталей направлено, прежде всего, на создание более легковесных машин, а также на экономию используемых материалов.

Кроме того, общими для генеративного проектирования и топологической оптимизации являются принципы проектирования, которые заключаются в оптимальном распределении материала в пределах доступного объема конструкции проектируемой детали с учетом наличия механическим нагрузок, граничных условий и ограничений. Материал распределяется таким образом, что он в основном содержится в тех областях детали, которые подвергаются большим нагрузкам, и удаляется в тех областях, где эти нагрузки малы. Такое распределение материала, приводящее к снижению массы детали, может проводиться двумя способами:

1) созданием новых или удалением существующих границ объема детали, т.е. изменением формы и размеров детали, в результате чего конструкция детали приобретает, как правило, каркасный вид;

2) заменой сплошного материала детали на повторяющиеся в ее объеме простейшие элементы любой формы, т.е. созданием ячеистой (решетчатой) структуры детали.

Отличительными для генеративного проектирования и топологической оптимизации являются процедуры проектирования. Для топологической оптимизации требуется наличие исходной 3D-модели, которая модифицируется по определенному алгоритму, в то время как для генеративного проектирования в такой модели нет принципиальной необходимости, поскольку оно основано на применении специализированного программного обеспечения, способного самостоятельно генерировать различные 3D-модели, отвечающие заданным условиям, из которых надо выбрать наиболее подходящую. При этом в процессе генеративного проектирования также не исключается возможность создавать новую конструкцию детали путем модифицирования существующей исходной конструкции.

Генеративное проектирование представляет собой более широкий методологический подход к проектированию деталей машин по сравнению с топологической оптимизацией, которая является одной из составляющих генеративного проектирования. Иначе говоря, средства генеративного проектирования представляют собой «набор инструментов, позволяющих создавать или модифицировать конструкцию», где «один из ключевых инструментов, поддерживающих генеративное проектирование, обеспечивает оптимизацию топологии».

Особая терминологическая проблема связана с биопроектированием. Она заключается в отсутствии однозначного определения роли биопроектирования среди других методологических подходов к проектированию, включая генеративное проектирование и топологическую оптимизацию.

Сущность биопроектирования состоит во внесение изменений в конструкцию детали с целью улучшения ее функциональных свойств путем целенаправленного придания ей конструктивных признаков, подобных тем, которые имеются у объектов живой природы. Нередко в результате генеративного проектирования или топологической оптимизации разрабатываются детали, которые по конструкции оказываются подобными объектам живой природы, хотя в ходе проектирования деталей не проводилось целенаправленного копирования конструктивных особенностей таких объектов, однако осуществляемое проектирование ошибочно называют бионическим. Кроме того, поэтапное модифицирование деталей, проводимое в ходе осуществления генеративного проектирования или топологической оптимизации, аналогично эволюционным процессам, протекающим в природе, что также дает основания ошибочно называть осуществляемое проектирование бионическим. Поэтому, во избежание терминологической путаницы, предлагается вводить понятие «чистое биопроектирование» для тех случаев, когда при проектировании деталей непосредственно используются технические решения, подсказанные природой.

Принято различать два подхода к биопроектированию: «от биологии к дизайну» и «от дизайна к биологии». В первом случае конструктор, вдохновленный техническими идеями, подсказанными природой, пытается применить их при проектировании новых изделий. Во втором случае конструктору дано конкретное задание по проектированию нового изделия, для выполнения которого он пытается найти нужные подсказки в природе.

Следует отметить, что конструктивные решения, подсказанные природой, далеко не всегда являются идеальными, готовыми для прямого применения, поэтому обычно они берутся за основу конструкции нового изделия, а затем дорабатываются в обычном порядке в процессе проектирования.

5.2 Аддитивные технологии и возможности проектирования деталей

Благодаря изготовлению деталей машин с помощью АМ-технологий не только снимается значительная часть ограничений на геометрию конструкции деталей при их проектировании, обусловленных традиционными технологиями изготовления, но и открываются принципиально новые возможности проектирования. В частности, становится возможным получать:

- каркасные (скелетные) и оболочковые типы конструкции деталей со сложно-фасонными наружными поверхностями;
- открытые и закрытые полости со сложно-фасонными внутренними поверхностями, в т.ч. в виде различных каналов – лабиринтных, спиральных, разветвленных, с переменным сечением;
- сложно-фасонный рельеф наружных или внутренних поверхностей;
- дискретная (ячеистая, решетчатая) внутренняя структура деталей;
- конструкции деталей, объединяющие в себе в единое целое составные детали функционально-аналогичных сборочных единиц.

Примерами конструкций деталей с особо сложной геометрией, которые могут быть созданы исключительно благодаря АМ-технологиям, являются конструкции конформных и градиентных типов.

Конструкции конформного типа характеризуются наличием конформных полостей, например, охлаждающих каналов, соответствующих по форме деталям, в которых эти каналы выполнены, или наличием конформной решетчатой структуры, у которой клетки решетки располагаются рядами, соответствующими по форме деталям, имеющих такую структуру. Также к конструкциям этого типа относятся такие, составные части которых формируются не на горизонтальной плоскости, как это обычно происходит при реализации АМ-технологий, а на сложно-фасонных, в том числе криволинейных поверхностях.

Конструкции градиентного типа характеризуются пространственным изменением состава, плотности или пористости материалов, из которых изготовлены детали, а если деталь имеет ячеистую (решетчатую) структуру, то – пространственным изменением геометрических параметров элементов структуры – размеров ячеек (клеток решеток) и толщины стенок ячеек (стержней решеток). Также конструкции этого типа могут характеризоваться пространственным изменением геометрических параметров элементов рельефа поверхности.

Значительные возможности совершенствования конструкции деталей, изготавливаемых с помощью АМ-технологий, связаны с применением техники топологической оптимизации, приводящей к снижению массы деталей.

Рассмотрим для пояснения два конструктивных варианта детали типа кронштейна, показанные на рис. 5.1. Обе детали имеют одинаковое функциональное назначение, работают в одинаковых условиях, но различаются геометрией. Геометрия первой детали оптимизирована с учетом ее изготовления по традиционным технологиям металлообработки: фрезерования, точения и др. Деталь, полученная таким образом, имеет сравнительно простую, форму, которую можно легко достигнуть на металлообрабатывающих станках. У второй детали геометрия гораздо сложнее, обеспечить ее традиционными технологиями весьма трудно. Выход из положения состоит в применении АМ-технологий. Благодаря такому решению проблемы происходит не только усложнение геометрии детали в результате топологической оптимизации, но и снижение ее массы: с 3,7 кг (рис. 5.1, а) в случае изготовления по традиционным технологиям до 2,67 кг (рис. 5.1, б) в случае изготовления по АМ-технологиям.

Об эффективности топологической оптимизации, приводящей к снижению массы, свидетельствуют представленные на рис. 5.2 и 5.3 конструктивные варианты деталей, полученных по разным технологиям.

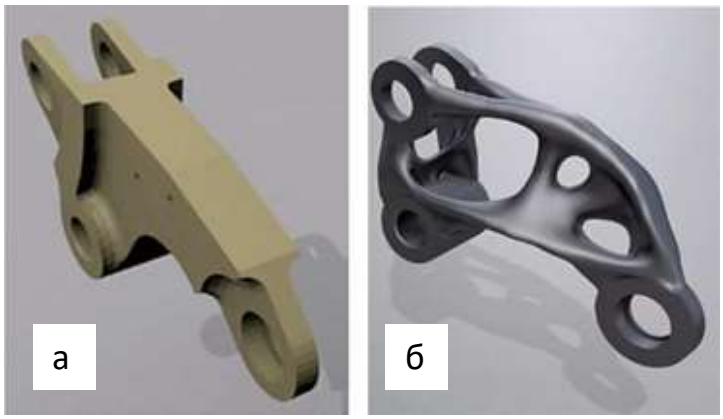


Рисунок 5.1 - Конструктивные варианты кронштейна, изготовленного с помощью традиционных технологий (а) и топологически оптимизированного и изготовленного с помощью АМ-технологий (б)

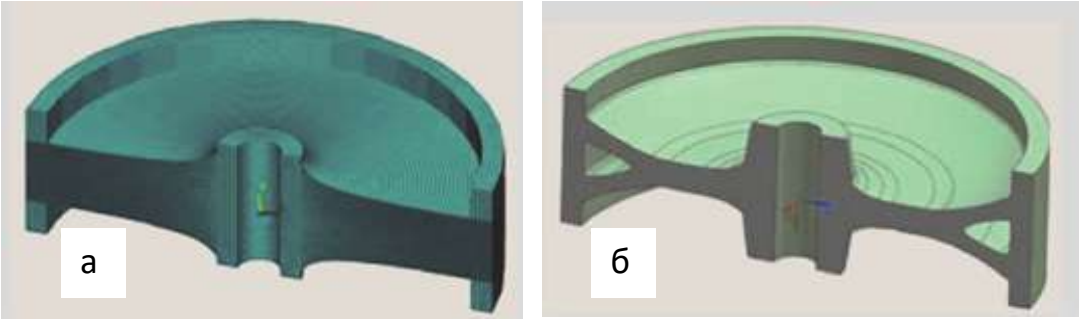


Рисунок 5.2 - Конструктивные варианты диска, изготовленного с помощью традиционных технологий (а) и топологически оптимизированного и изготовленного с помощью АМ-технологий (б) Масса детали: 178,9 кг (а) 120,25 кг (б)

Рисунок 5.3 - Конструктивные варианты детали, топологически оптимизированной и полученной разными технологиями: а – деталь получена резанием, масса 737 г; б – деталь получена литьем, масса 412 г; в – деталь получена с помощью АМ-технологий, масса 295 г; соотношение массы отходов к массе готового изделия: 15:1 9(а); 10:1 (б); 1,5:1 (в)

Обычно при проектировании изделия отрабатывается множество вариантов его конструкции, что позволяет наилучшим образом выбрать оптимальное решение (рис. 5.4).

Рисунок 5.4 - Конструктивные варианты кронштейна

Снижение массы деталей машин при сохранении требуемой прочности является важной, но не единственной целью, которая ставится при их проектировании. Например, ячеистые (решетчатые) структуры, создаваемые с помощью АМ-технологий, могут не только обеспечивать приемлемое снижение массы деталей, но и придавать им улучшенные эксплуатационные свойства (прочностные, термические, акустические, демпфирующие и др.).

Особый практический интерес представляет изучение возможностей применения АМ-технологий для изготовления деталей, конструкция которых определяется в результате биопроектирования, поскольку, с одной стороны, АМ-технологии позволяют наиболее полно реализовать достоинства биопроектирования и, с другой, многие конструкции деталей со сложной, нестандартной геометрией, которую предлагает биопроектирование, могут быть изготовлены только с помощью АМ-технологий.

В табл. 5.1-5.3 приведены типичные технические решения, связанных с биопроектированием и последующим аддитивным производством деталей сельхозтехники. Следует заметить, что все эти решения подсказаны природой, т.е. связаны с «чистым биопроектированием».

Таблица 5.1 - Биопроектирование деталей почвообрабатывающих и уборочных машин (модифицирование внешней геометрии)

Сущность биопроектирования	Достигаемые эффекты
1	2
Нож культиватора-плоскореза, закрепленный на двух стойках, с криволинейной режущей кромкой в горизонтальной плоскости и треугольными выступами на боковых частях подобно лобовой части ската-рогача	Обеспечивается равномерное распределение давления ножа на почву и равномерное рыхление почвы, повышается устойчивость работы в продольной плоскости, снижается тяговое сопротивление
Зубчатые лемеха плоскореза, у которых режущие кромки зубьев по расположению вдоль лезвия лемеха и вырезы между зубьями по форме подобны роющим конечностям крота или медведки	Обеспечивается равномерное распределение давления зубьев на почву, исключается забивание почвы между зубьями, усиливается крошение почвы, снижается тяговое сопротивление
Рыхлительные элементы дисков кольчато-режущего катка в форме усеченных конусов подобно роющим конечностям жука-носорога	Обеспечивается равномерное распределение контактного давления на почву
Рабочий орган уплотнителя почвы в виде зубчатого колеса с зубьями, по форме подобными зубцам передней ноги навозного жука	Снижается сопротивление проникновению в почву, улучшается качество уплотнения почвы
Плуг-запашник с рабочей частью, по форме подобной голове кабана	Снижается тяговое сопротивление
Лезвия полозовидных ножей катка-глыбодробителя, подобные по форме клюву птицы топорка	Усиливается измельчение комков земли по всей ширине захвата
Стойка культиватора, подобная по форме профиля когтю барсука	Снижается тяговое сопротивление
Зубья жатки, подобные по форме когтям лап медведки	Повышается производительность жатки
Лезвие жатки, по форме подобное режущему зубу жука-усача	Повышается режущая способность и качество резания
Лезвие лущильника, имеющее зубчатую форму подобно шипам передней ноги богомола	Повышается производительность лущильника

Ниже рассмотрены некоторые примеры реализации таких решений.

На рис. 5.5, а показаны роющие конечности крота, а на рис. 5.5, б – бионический зубчатый плоскорезный рабочий орган, у которого режущие кромки зубьев по расположению вдоль лезвия лемеха и вырезы между зубьями по форме подобны роющим конечностям крота. Благодаря этому обеспечивается равномерное распределение давления зубьев на почву, исключается забивания пространства между зубьями почвой, усиливается крошение почвы, снижается тяговое

сопротивление, повышаются заглубляемость, устойчивость хода по глубине, равномерность износа и срок службы ножа.

Таблица 5.2 - Биопроектирование деталей почвообрабатывающих и транспортных машин (модифицирование геометрии рельефа поверхности)

Сущность биопроектирования	**Достигаемые эффекты**
Поверхности стойки и рыхлительной лапы почвоуглубителя, взаимодействующие с грунтом, имеют риблеты подобно панцирю моллюсков, чешуе панголина или акулы	Снижается тяговое сопротивление и повреждение почвы, повышается стрессовая устойчивость посевов
Поверхности отвального плуга и бульдозерного отвала, взаимодействующие с грунтом, имеют множество бугорков подобно поверхности головы навозного жука	Уменьшается адгезия грунта к рабочей поверхности, снижается тяговое сопротивление, повышается износостойкость
Загрузочные и разгрузочные желоба ленточных транспортеров сыпучих материалов, у которых поверхности, подвергающиеся воздействию этих материалов, имеют риблеты подобно поверхности головы навозного жука, задней части жужелицы, чешуе панголина или песчаной ящерицы	Повышается износостойкость

Таблица 5.3 - Биопроектирование деталей различных сельхозмашин (модифицирование внутренней структуры)

Сущность биопроектирования	**Достигаемые эффекты**
Структура детали оболочкового типа с ребрами жесткости, распределенными вдоль продольной оси детали, подобно узлам бамбука,распределенным вдоль его стебля	Повышение прочности на изгиб и амортизирующая способность
Ячеистая (решетчатая) структура детали, подобная пчелиным сотам, древесным клеткам или костной ткани	Снижается массы при сохранении требуемой прочности
Градиентная ячеистая (решетчатая) структура детали, подобная градиентной структуре ткани растений	Повышается прочность

Рисунок 5.5 - Роющие конечности крота (а) и бионический зубчатый плоскорезный рабочий орган (б)

На рис. 5.6, а показан скат-рогач, у которого на лобовой части имеются два выступающих вперед плавника, похожих на рога, а на рис. 5.6, б – бионический нож культиватора-плоскореза, закрепленный на двух стойках, с криволинейной режущей кромкой в горизонтальной плоскости и треугольными выступами на боковых частях, подобными плавникам-рогам ската-рогача. Благодаря такой конструкции ножа обеспечиваются равномерное распределение давления ножа на почву, повышение устойчивости работы в продольной плоскости, равномерное рыхление почвы, снижение тягового сопротивлении.

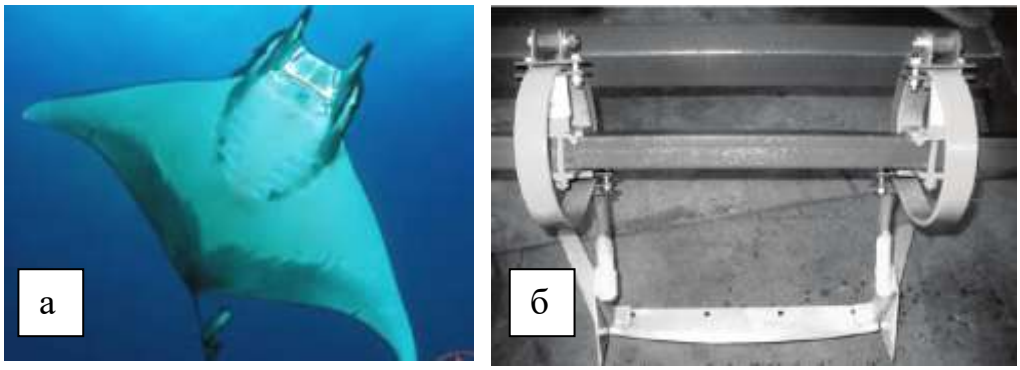
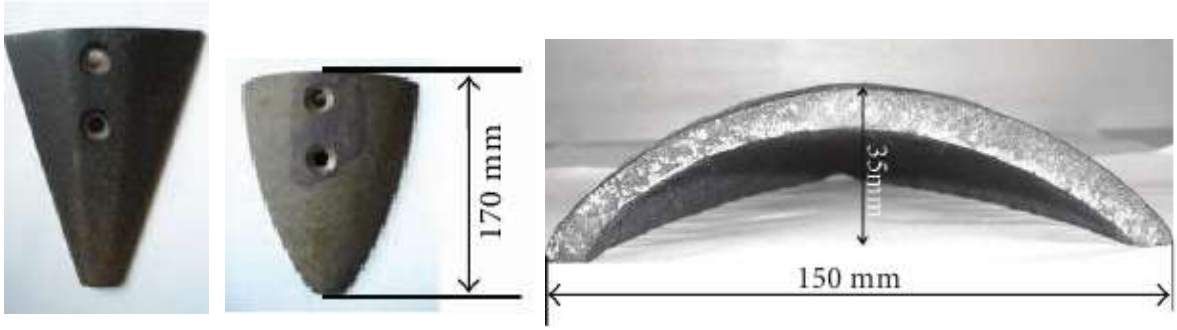


Рисунок 5.6 - Скат-рогач (а) и нож культиватора-плоскореза (б)

На рис. 5.7 показана модель головы кабана. Главная особенность головы кабана, используемая для поиска корма, состоит в ее передней части. Она похожа на запашник с точки зрения ее функции, связанной с обработки почвы, и испытываемых при этой обработке нагрузок. На рис. 5.8 показаны традиционный запашник и бионический запашник, который подобен по форме передней части головы кабана, благодаря чему снижается сопротивление проникновению в почву в процессе ее обработки и, как следствие, требования к тяге и энергопотребление

Рисунок 5.7 - Модель головы кабана



а б в

Рисунок 5.8 - Конструктивные варианты запашника
а – традиционный запашник, б – бионический запашник,
в – поперечное сечение бионического запашника

На рис. 5.9 показаны ж*ук*-дровосек и его режущий зуб, а на рис. 5.10 – режущие лезвия кукурузной жатки: обычное и бионическое, у которого кривая профиля подобна той, какую имеет режущий зуб жука-дровосека. Такая геометрия режущего лезвия обеспечивает высокую производительность, сильную режущую способность и хорошее качество резания жатки.

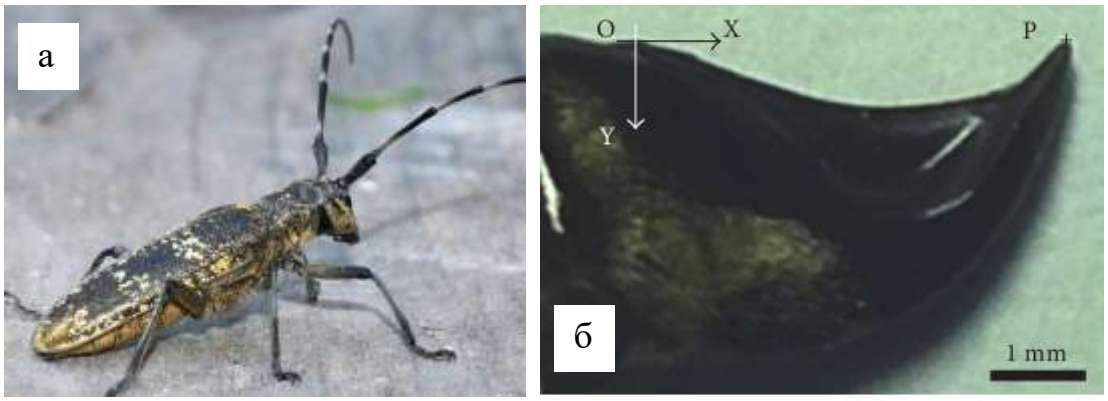


Рисунок 5.9 - Ж*ук*-дровосек (а) и его режущий зуб (б)

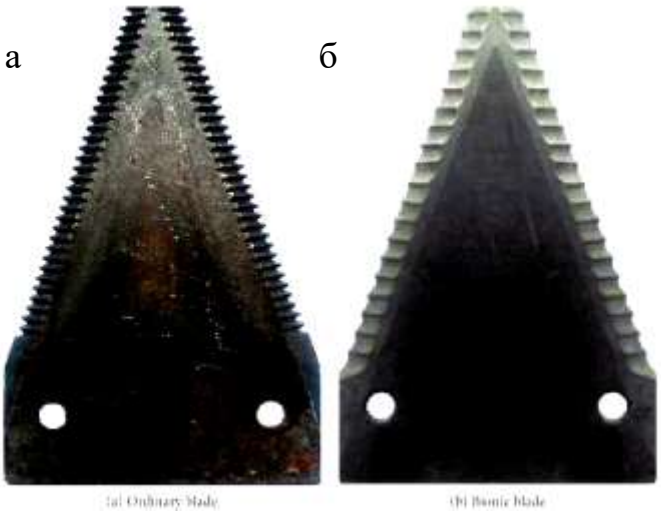


Рисунок 5.10 - Режущие лезвия кукурузной жатки: обычное (а) и бионическое (б)

На рис. 5.11, а показан богомол – хищное насекомое, у которого есть мощный инструмент для нападения – две сильные и острые передние ноги. Строение такой ноги показано на рис. 5.11., б. Бедренная и большеберцовая кости оснащены острыми шипами вдоль их задних краев, которые способны прочно захватить добычу, когда обе кости складываются друг на друга при захвате.

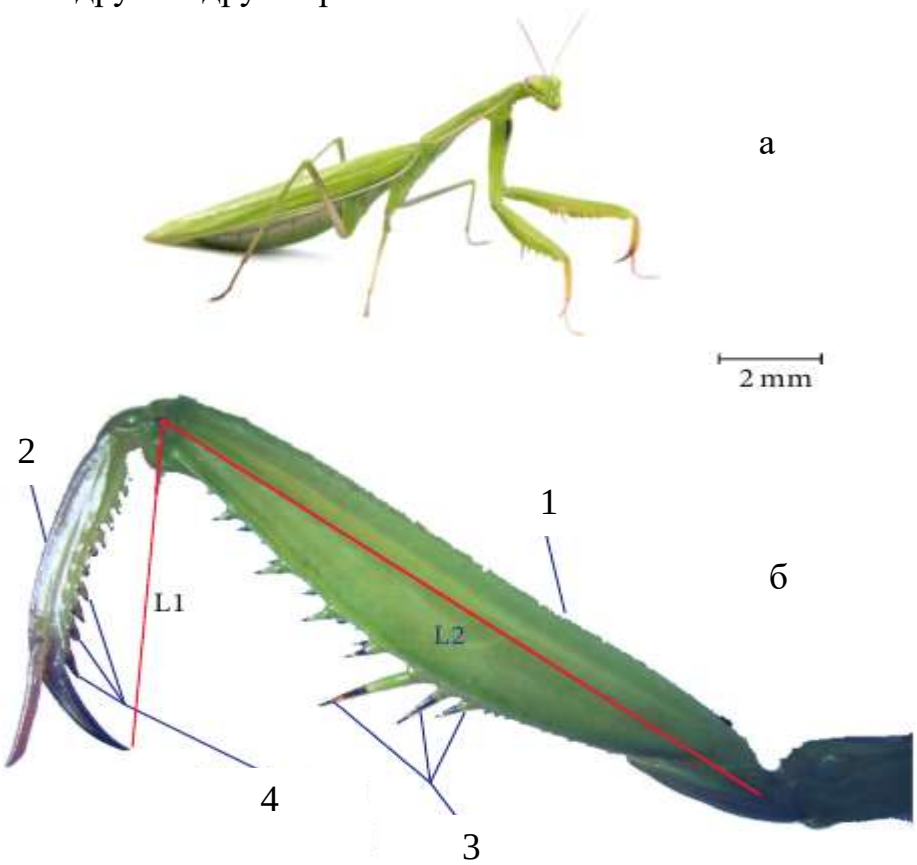


Рисунок 5.11 - Богомол (а) и его передняя нога (б)
1 – бедренная кость, 2 – большеберцовая кость, 3 – шипы бедренной кости, 4 – шипы большеберцовой кости L1 = 16,5 мм, L2 = 24,7 мм

На рис. 5.12 представлены режущие лезвия сельскохозяйственных инструментов для резки почвы: обычное лезвие с гладкой кромкой и бионическое лезвие, оснащенное зубьями, подобными шипам у богомола, что приводит к повышению эффективности резки.

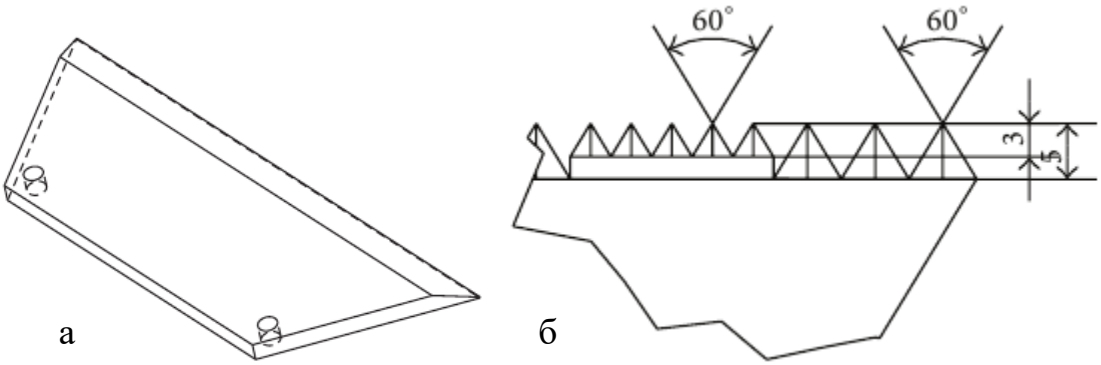


Рисунок 5.12 - Обычное (а) и бионическое (б) режущие лезвия сельскохозяйственных инструментов для резки почвы

На рис. 5.13 показаны ушастая сова, ее крыло и профиль крыла. Крыло отличается тем, что во время полета вся его поверхность определенным образом изгибается по отношению к набегающему воздушному потоку, кроме того, толщина аэродинамического профиля крыла постепенно уменьшается в направлении от передней кромки к задней кромке. Благодаря таким особенностям крыла сова имеет превосходные летные характеристики, кроме того ее полет происходит почти бесшумно.

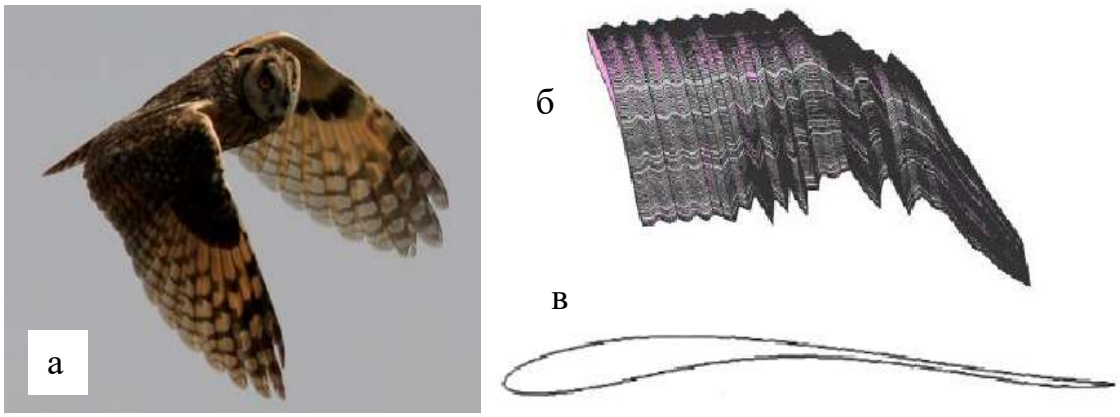


Рисунок 5.13 - Летящая ушастая сова (а), ее крыло (б) и профиль крыла (в)

На рис. 5.14 показано рабочее колесо (крыльчатка) многолопастного центробежного вентилятора с бионическими лопастями, которые подобны по форме крылу совы, из-за чего улучшаются аэродинамические характеристики вентилятора, повышается его производительность, подавляется шум, возникающий от его работы.

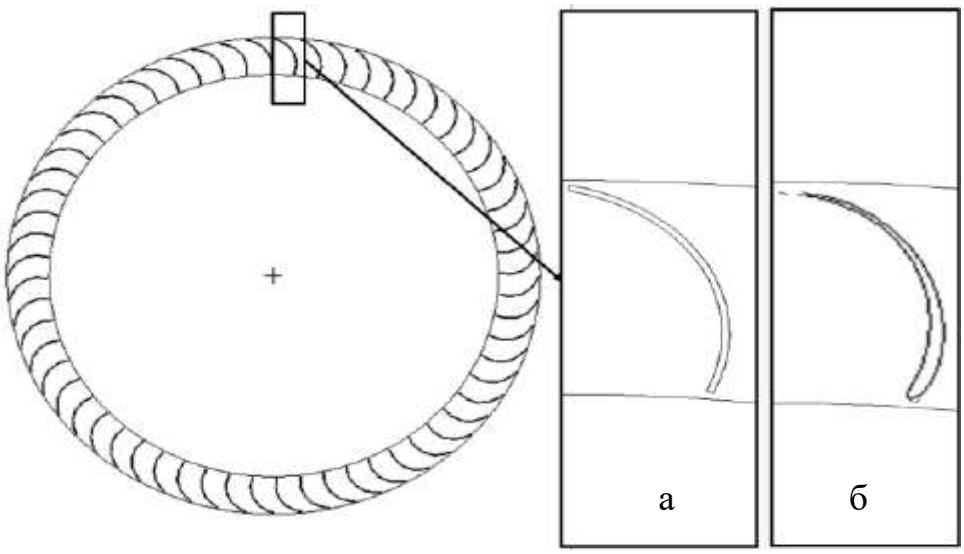


Рисунок 5.14 - Рабочее колесо вентилятора и его лопасти: обычная (а) и бионическая (б)

На рис. 5.15 показаны большая белая акула и фрагмент ее кожи с пластинчатой чешуей, имеющей низкое сопротивление при движении акулы в воде. На рис. 5.16 показаны модели бионических глубокорыхлителей, у которых на разных участках поверхности сформированы системы выступов, наподобие чешуи акулы. Благодаря этому глубокорыхлители имеют более низкое сопротивление проникновению в почву.

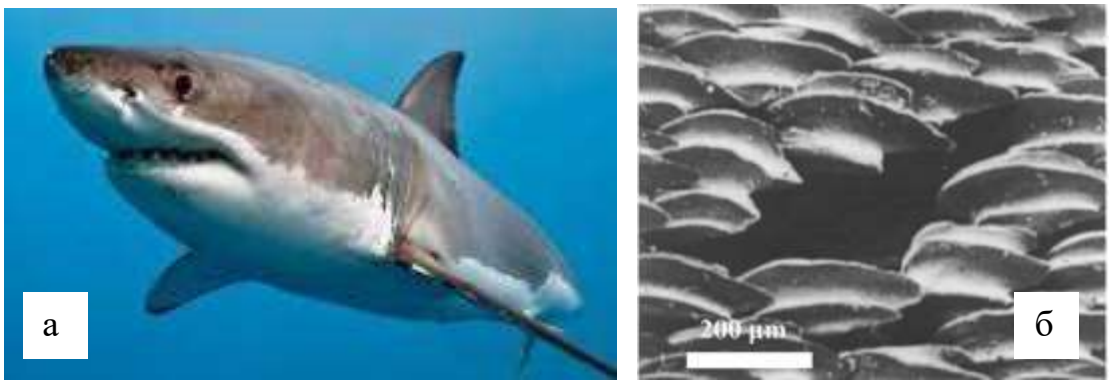


Рисунок 5.15 - Большая белая акула (а) и фрагмент ее чешуи (б)

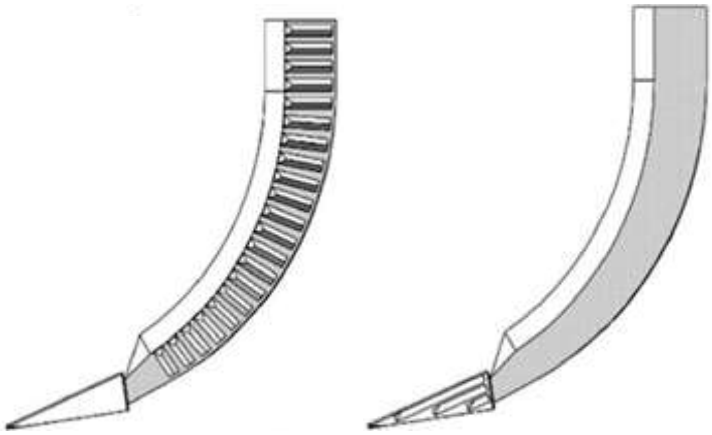
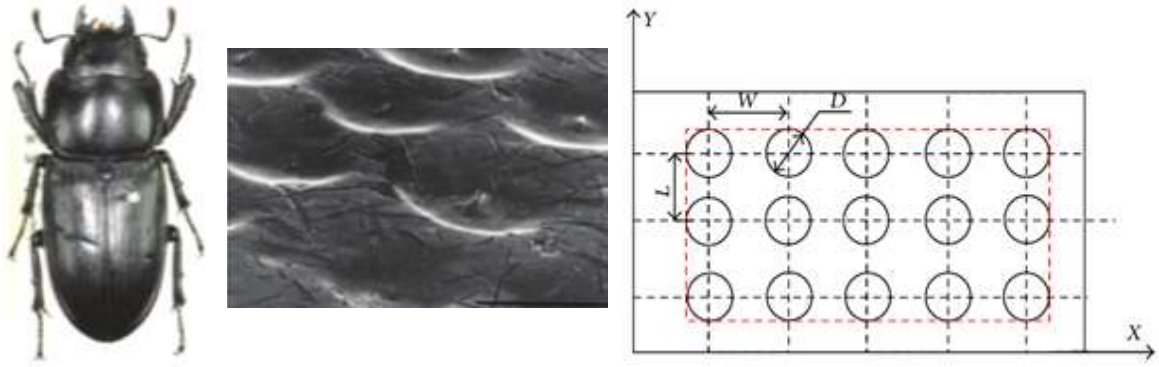


Рисунок 5.16 - Бионические модели глубокорыхлителей

На рис. 5.17, а, б и в показаны, соответственно, морфология поверхности навозного жука, ее текстура на груди, образованная множеством углублений (ямок), и описывающая ее математическая модель, в которой учитываются такие факторы, как диаметр *D* и глубина *S* углублений, расстояния *L* и *W* между ними. Такая ямочковатая поверхность навозного жука обладает превосходными износостойкими свойствами, поскольку обеспечивает снижение сопротивления при движении жука в почве. Это обусловлено тем, что ямочки на поверхности жука тела уменьшают площадь контакта между поверхностью тела и почвой.



а б в

Рисунок 5.17 - Морфология поверхности навозного жука (а), ее микроструктура на груди (б) и математическая модель (в)

На рис. 5.18 показаны элементы конструкции насоса гидротрансформатора, устанавливаемого в автоматических коробках передач. Поверхность этих элементов содержит множество углублений,

как поверхность навозного жука, благодаря чему достигается снижение сопротивления прокачиваемой жидкости и повышение производительности насоса.

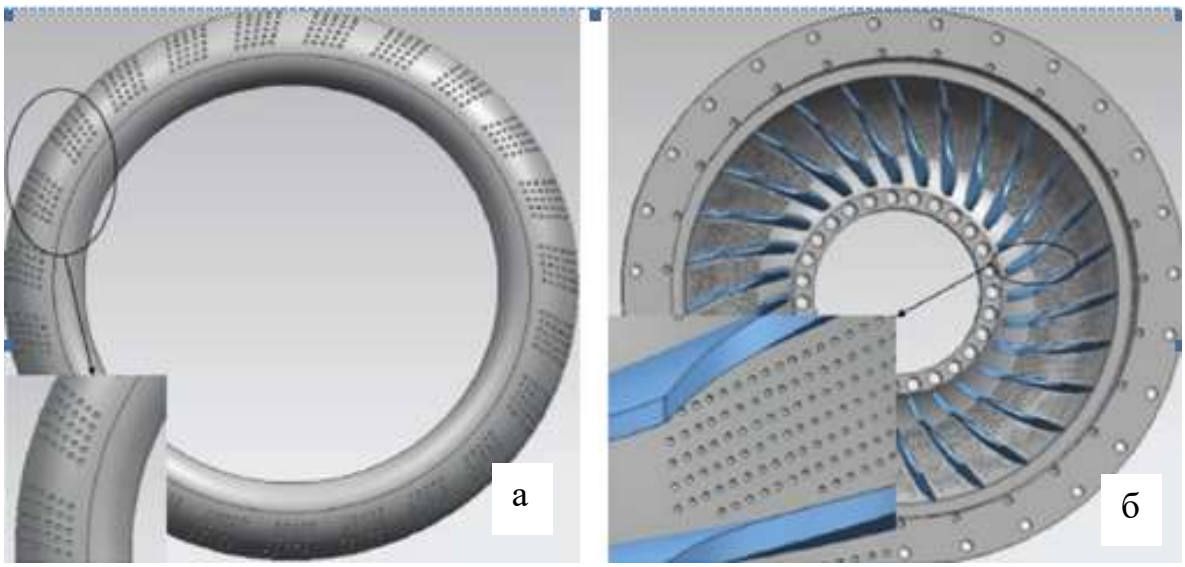


Рисунок 5.18 - Насос с негладкой (содержащей углубления) поверхностью сердечника (а) и оболочки (б)

На рис. 5.19 показаны два варианта поршня бурового насоса с нейлоновой вершиной и полиуретановой боковой стенкой: обычный и бионический. У обычного поршня поверхность стенки гладкая, а у бионического поршня на ней сформированы ямочки подобно тем, что имеются на поверхности навозного жука, благодаря чему повышается срок службы поршня.

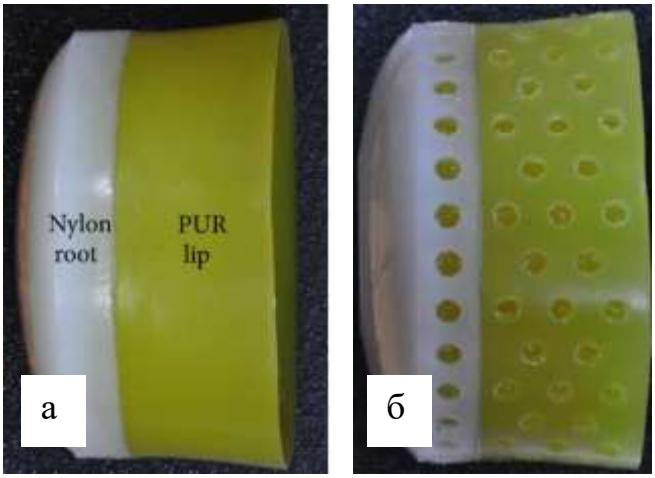


Рисунок 5.19 - Обычный (а) и бионический (б) поршни бурового насоса

5.3 Аддитивные технологии и ограничения проектирования деталей

Эффективность проектирования деталей машин зависит от особенностей реализации различных видов АМ-технологий, используемых для их изготовления. Подавляющее большинство деталей машин являются металлическими, поэтому особый практический интерес представляют такие АМ-технологии, которые позволяют непосредственно изготавливать детали из металла.

Каждый вид АМ-технологий имеет свои особенности, связанные со свойствами расходных материалов и условиями осуществления процесса построения. Эти особенности могут откладывать определенный отпечаток на характер проектирования деталей, в т.ч. ограничивать возможности внесения изменений в их конструкцию.

Основные ограничения, накладываемые разными видами АТ на конструкции проектируемых деталей, обусловлены особенностями осуществления процессов аддитивного построения деталей и связаны, прежде всего, с использованием поддерживающих материалов иобразованием ступенчатого рельефа.

Поддерживающие материалы используются в некоторых видах АМ-технологий, чтобы обеспечить временные подпорки для нависающих или выступающих элементов конструкции, создаваемых в процессе построения деталей, например, сильно наклоненной стенки или выступа балконного типа. После завершения построения поддерживающий материал должен быть удален, что не всегда удается сделать, например, если его приходится удалять механическим путем из труднодоступных мест. Для решения данной проблемы при проектировании конструкции деталей следует отказаться от нависающих элементов либо делать их такими, чтобы поддерживающий материал можно было бы полностью удалить. Подобные проблемы возникают в некоторых видах АМ-технологий, когдаоказывается невозможным удалить поддерживающий материал из закрытых илисложнофасонных открытых полостей, а также из клеток решетчатой структуры. В таких случаях также следует вводить соответствующие изменения в проектируемые конструкции деталей.

Ступенчатый рельеф образуется на наклонных поверхностях создаваемых деталей, что характерно практически для всех видов АМ-технологий в силу присущего им послойного характера процесса построения. Наличие такого рельефа рассматривается как весьма нежелательное явление с учетом требований, предъявляемых к качеству деталей. Во избежание этого явления при проектировании конструкции деталей желательно делать углы наклона поверхностей или их отдельных участков относительно горизонтальной строительной платформы близкими к 90°, а в лучшем случае равными 90°, а также

уменьшать толщину наращиваемых слоев и выбирать их оптимальную ориентацию.

К другим ограничениям, накладываемым разными видами АМ-технологий на конструкции проектируемых деталей, относятся:

-максимальные габаритные размеры деталей – определяются максимальнымиразмерами зоны построения используемых типов технологического оборудования (3D-принтеров);

- точность построения деталей – определяется толщиной последовательно формируемых слоев строительного материала: чем меньше толщина слоев, тем выше точность построения (для 3D-принтеров каждого типа существуют определенные минимальные толщины слоев, которые могут быть достигнуты с учетом свойств используемых строительных материалов и механизмов формирования из них слоев);

- используемые строительные материалы (каждый тип 3D-принтеров предназначен для работы с определенными строительными материалами).

Чтобы обеспечить более эффективное проектирование деталей машин, следует выбирать такие виды АМ-технологий и такие типы технологического оборудования для изготовления проектируемых деталей, которые привносят наименьшие ограничения в их конструкцию.

5.4 Роль быстрого прототипирования при проектировании деталей

Прототип в переводе с древнегреческого языка буквально означает «первообраз».

При проектировании деталей машин под прототипами обычно понимают «первообразы» деталей в виде их моделей, макетов или экспериментальных образцов.

Модель – 3D-объект, воспроизводящий или имитирующий конкретные свойства проектируемой детали, созданный для проверки принципа ее действия и определения ее характеристик.

Макет – 3D-объект, представляющий собой упрощенное воспроизведение в определенном масштабе проектируемой детали, на котором исследуются ее характеристики, проверяется правильность принятых конструкторских решений, включая решения, относящиеся к внешнему виду.

Экспериментальный образец – 3D-объект, обладающий основными признаками проектируемой детали, созданный для проверки предполагаемых конструкторских решений и уточнения отдельных характеристик детали (экспериментальный образец выполняется в натуральную величину и представляет собой законченную в

функциональном отношении деталь, пригодную для проверочных проектных испытаний).

С помощью прототипов на разных стадиях проектирования отрабатывается геометрия детали, оцениваются ее эргономические качества и внешний вид, проверяется собираемость узлов и правильность компоновочных предложений. Прототипы подвергают испытаниям с целью проверки функциональности проектируемых деталей (в том числе в составе узлов и машин).

Традиционное изготовление прототипов деталей является длительным и дорогостоящим. Обычно детали в ходе проектирования, после проведения очередных испытаний, приходится подвергать доработке, в частности, изменять их форму. Как следствие, всякий раз приходится изготавливать модифицированные прототипы деталей. Нередко для изготовления прототипов требуется разрабатывать и создавать специальную технологическую оснастку, которая также должна модифицироваться по мере доработки деталей.

Значительному повышению эффективности проектирования деталей машин (равно как узлов машин и машин в целом) способствует использование техники быстрого прототипирования (Rapid Prototyping).

Быстрое прототипирование представляет собой одно из направлений развития АМ-технологий, которое заключается в быстром создания моделей, макетов или экспериментальных образцов изделий.

В основном быстрое прототипирование применяется при проектировании изделий. При этом создаваемые прототипы предназначаются:

- для визуализации изделия, воспроизведения его геометрического образа с целью демонстрации заказчику;
- для проверки принципиальных возможностей изготовления изделия;
- для оценки функциональных, эргономических и технико-эстетических характеристик изделия;
- для проверки собираемости изделия (качества сборочных единиц);
- для концепт-моделирования.

Наибольшее распространение получило быстрое прототипирование при проектировании деталей машин, когда с целью совершенствования конструкции детали ее прототипы, полученные с помощью АМ-технологий, подвергаются различным испытаниям (стендовым механическим испытаниям, аэрогидродинамическим испытаниям и др.) с последующей конструкторской доработкой. Особой практической ценностью обладают испытания прототипов в реальных условиях эксплуатации проектируемых деталей.

АМ-технологии позволяют создавать экспериментальные образцы (функциональные прототипы) изделий в короткие сроки без

применения дорогостоящей технологической оснастки. Так, для проверки функциональности проектируемого изделия, например, блока цилиндров ДВС, традиционно изготавливаемого путем литья, можно использовать его прототип, изготовленный с помощью АМ-технологий без какой-либо литейной оснастки. И только после окончательного завершения проектирования детали, а также технологии ее изготовления можно создавать полноценную литейную оснастку для производственных нужд.

Для целей быстрого прототипирования обычно применяют сравнительно недорогие 3D-принтеры. При этом прототипы деталей чаще всего печатают из пластиков, включая прототипы металлических деталей – с учетом того, что прочностные свойства пластиков могут быть вполне достаточными для проведения испытаний на функциональность (рис. 5.20).

На рис. 5.21 показан прототип впускной трубы ДВС, который оснащен элементами системы топливоподачи и подготовлен к проведению стендовых моторных испытаний. Изготовление для испытаний опытного образца изделия из алюминия, включая разработку и изготовление литейной оснастки, а также механическую обработку, потребовало бы много времени и финансовых средств. Прототип же выполнен с помощью АМ-технологий из полиамида – высокопрочного термостойкого полимерного материала, что оказалось значительно быстрее и дешевле.

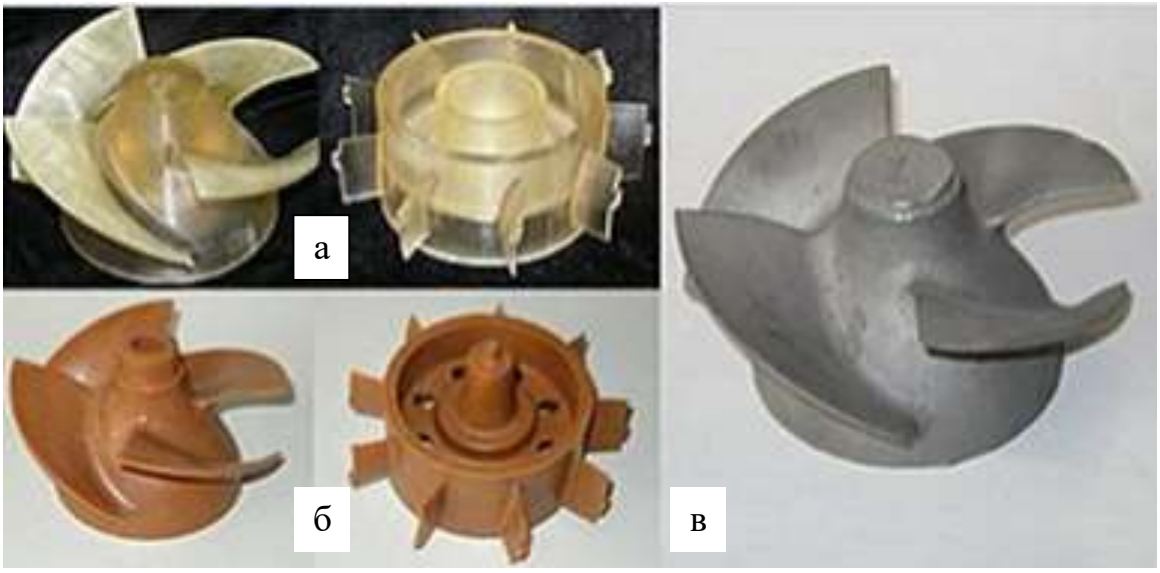


Рисунок 5.20 - Пластиковые SLA-модели рабочих колес для водометных движителей (а), изготовленные по ним восковые модели (б) и готовая металлическая отливка (в)

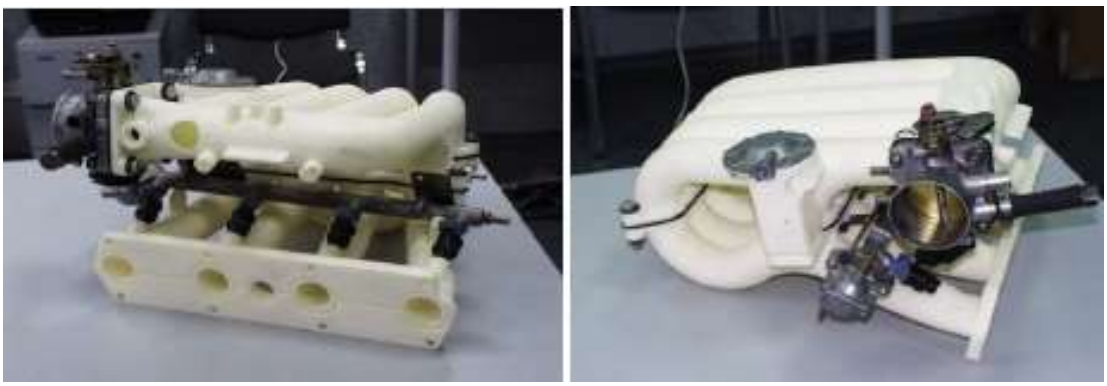


Рисунок 5.21 - Прототип впускной трубы ДВС

Ниже рассмотрена роль быстрого прототипирования на примере проектировании и изготовлении новых модификаций ковша экскаватора (рис. 5.22).

Быстрое прототипирование обеспечивает:

- визуализацию внешнего вида ковша;
- подтверждение совместимости кинематических параметров ковша с базовой машиной (экскаватором);
- возможность оценки заполнения ковша грунтом и его последующей разгрузки, что важно учитывать при работе с грунтами, характеризующимися высокой липкостью или примерзаемостью;
- возможность исследования особенностей стружкообразования при резании грунта ковшом;
- выявление участков ковша, подвергаемых наибольшему абразивному износу при работе;
- проработку отдельных элементов традиционного технологического процесса изготовления ковша (сборки, сварки, механической обработки, покраски).

Рис. 5.22 - Ковш экскаватора

Роль быстрого прототипирования может значительной увеличиться за счет использования для изготовлении прототипов разнообразных по свойствам материалов. Например, прототип из

прозрачного полимера позволяет изучать не только взаимодействие поверхностей рабочего органа экскаватора с грунтом при заполнении, но также и процессы, происходящие в разрабатываемом грунте. Это способствует оптимизации формы ковша, при которой обеспечивается наименьшие сопротивление при копании грунта.

Благодаря испытаниям прототипа ковша становится возможным:

- сэкономить средства на натурные испытания ковша;
- предотвратить ошибки при проектировании и сборке ковша;
- уменьшить массу ковша;
- повысить эффективность разработки грунта ковшом и, как следствие, снизить расход топлива;
- повысить надежность ковша;
- оценить срок службы ковша и интенсивность изнашивания его зубьев при разработке различных типов грунтов.

Быстрому прототипированию уделяется важное место в концептуальном моделировании, когда необходимо как можно полнее представить образ впервые проектируемого изделия (рис. 5.23).

Благодаря наличию концепт-модели становится возможным решить ряд задач, способствующих улучшению потребительских свойств нового продукта:

- изучить геометрию изделия с учетом его взаимодействия с реальным окружением;
- проверить удобства пользования изделием;
- оперативно внести необходимые коррективы во внешний вид изделия, его форму и размеры;
- провести маркетинговые исследования, позволяющие прогнозировать будущее отношение к изделию со стороны потенциальных потребителей;
- экспонировать новый продукт на выставках и презентациях для более активного продвижения на рынок.

Рисунок 5.23 - Макет АМ-электрогенератора для визуализации концепта

новой продукции

Особой разновидностью «быстрого прототипирования» является изготовление «быстрой оснастки» (Rapid Tooling). «Быструю оснастку» изготавливают при проектировании изделий в тех случаях, когда их прототипы невозможно создать только лишь с помощью АМ-технологий, а требуется специальная технологическая оснастка (литейная, штамповая и др.). Поскольку традиционное изготовление оснастки обычно связано со значительными временными и финансовыми затратами, то эффективным решением проблемы является применение АМ-технологий, т.е. изготовление «быстрой оснастки», что ведет в целом к сокращению длительности и стоимости изготовления нового продукта. АМ-технологии «rapid tooling» получили наибольшее распространение для создания формообразующей оснастки (рис. 5.24).

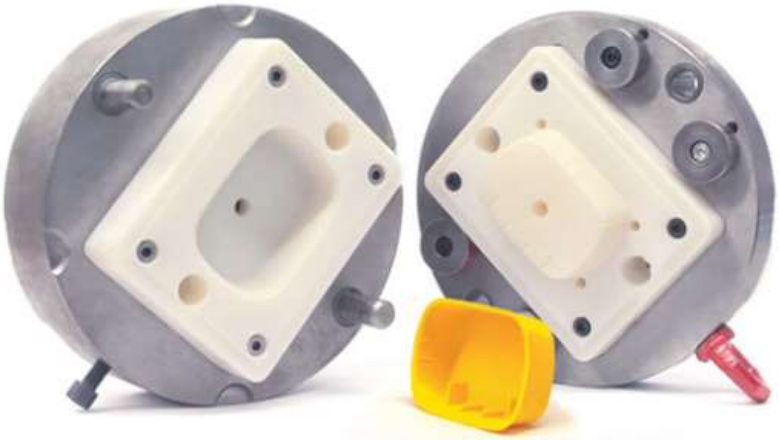


Рисунок 5.24 - Пример технологии «rapid tooling»: литейная АМ-оснастка и отлитая с ее помощью на термопласт-автомате пластиковая деталь

Перспективная область применения быстрого прототипирования – создание макетов строительных объектов, технических сооружений, транспортных узлов, ландшафтов при проектировании производственных и жилых зон.

Контрольные вопросы

1. Укажите общие и отличительные признаки генеративного проектирования и топологической оптимизации.
2. В чем состоит сущность биопроектирования?
3. Охарактеризуйте два подхода к биопроектированию.
4. Какие новые возможности проектирования открываются благодаря применению аддитивных технологий?

5. Приведите примеры биопроектирование деталей почвообрабатывающих и уборочных машин, связанные с модифицированием внешней геометрии.
6. Приведите примеры биопроектирование деталей почвообрабатывающих и уборочных машин, связанные с модифицированием геометрии рельефа поверхности.
7. Приведите примеры биопроектирование деталей почвообрабатывающих и уборочных машин, связанные с модифицированием внутренней структуры.
8. Какие ограничения проектирования деталей обусловлены применением аддитивных технологий?
9. Что обычно понимают под прототипами при проектировании деталей машин?
10. Для чего предназначается быстрое прототипирования при проектировании деталей?
11. Для чего используют концепт-модели?

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

6.1 Производство деталей из металлов

В промышленности в основном применяются две группы АМ-технологий, позволяющих печатать металлами:

1) технологии, в которых металлические порошки селективно связываются склеивающим веществом (при этом полученные изделия подвергаются дополнительному обжигу);

2) технологии, в которых металлические порошки подвергаются селективному спеканию или сплавлению лазерным или электронным лучом.

С их помощью можно получать изделия из различных металлов: нержавеющей стали, бронзы, титановых, никелевых и алюминиевых сплавов, сверхпрочного сплава кобальт-молибден-хром и др. Изделия, создаваемые по технологиям 1-й группы, характеризуются сравнительно большой пористостью и, соответственно, малой прочностью, поэтому эти технологии имеют ограниченное распространение. Гораздо более широко используются технологии 2-й группы, прежде всего, те, в которых металлические порошки подвергаются сплавлению, поскольку в этом случае получаемые изделия обладают плотной и прочной структурой. Однако стоимость, оборудования, с помощью которого реализуются технологии 2-й группы, весьма высокая.

Различают два вида АМ-технологий, основанных на лазерном спекании металлических порошков: DMLS, Direct Metal Laser Sintering –

прямое лазерное спекание металлов и IMLS, Indirect Metal Laser Sintering – непрямое лазерное спекание металлов.

В DMLS-технологии лазерному спеканию подвергаются либо однородные по составу металлические порошки, либо смеси металлических порошков с разными температурами плавления. В первом случае обеспечивается частичная (поверхностная) плавка частиц порошка, необходимая для спекания, в то время как во втором случае спекание происходит за счет плавления легкоплавкого компонента порошковой смеси. На рисунке 6.1 показан типичный пример металлического изделия, созданного по DMLS-технологии.

В IMLS-технологии используют смесь порошков металла и полимера или порошок металла, частицы которого покрыты полимером, где полимер играет роль связки на стадии первичного формирования изделия, после чего оно подвергается термообработке, в ходе которой полимер удаляется, а образовавшийся пористый металлический каркас дополнительно спекается и пропитывается металлом-связкой.

В промышленности наиболее распространены АМ-технологии, основанные на селективном лазерном сплавлении металлических порошков, т.е. SLM-технологии. С помощью этих технологий можно быстро изготавливать сложные по геометрии металлические изделия, которые по своим качествам превосходят литейное и прокатное производство.

Рисунок 6.1 - Деталь турбины, созданная по DMLS-технологии

В процессе лазерного плавления металлического порошка важно обеспечивать регулирование мощности лазера. Чем больше мощность лазера, тем быстрее расплавляется металл и тем быстрее строится деталь. С другой стороны, поскольку в точечную зону лазерного воздействия подводится большое количество энергии, процесс плавления частиц металла идет очень интенсивно и нередко имеет взрывной, трудно контролируемый характер, что приводит к значительному снижению качества создаваемых изделий. При этом становится весьма затруднительным построение сложных тонкостенных элементов изделий.

Для решения этой проблемы разработано АМ-оборудование, в котором порошок обрабатывается с помощью двух лазеров. Примером тому является установка SLM 500HL компании SLM Solutions (Германия). В ней основной нагрев металла осуществляется более мощным лазером, в то время как менее мощный лазер непосредственной формирует внешний контур детали, а также тонкие стенки. Благодаря этому удается создавать детали с толщиной отдельных фрагментов до 0,3 мм (рис. 6.2), кроме того, увеличивается в несколько раз скорость построения детали, улучшается внутренняя структура и чистота внешней поверхности (Ra 5-10).

Рисунок 6.2 - Деталь, созданная по SLM-технологии.
Толщина рёбер 0,35 мм

Примером реализации уникальных возможностей SLM-технологии является создание металлического химического реактора высокого давления со встроенными извилистыми каналами для нагревания или охлаждения его поверхности (рис. 6.3).

Рисунок 6.3 - Реактор высокого давления со встроенными каналами (SLM-технология)

Другой пример эффективного применения SLM-технологии – создание лопаток газовых турбин, имеющих цельную конструкцию, характеризующихся сложной формой с криволинейными поверхностями и наличием системы встроенных каналов конформного охлаждения (рис. 6.4).

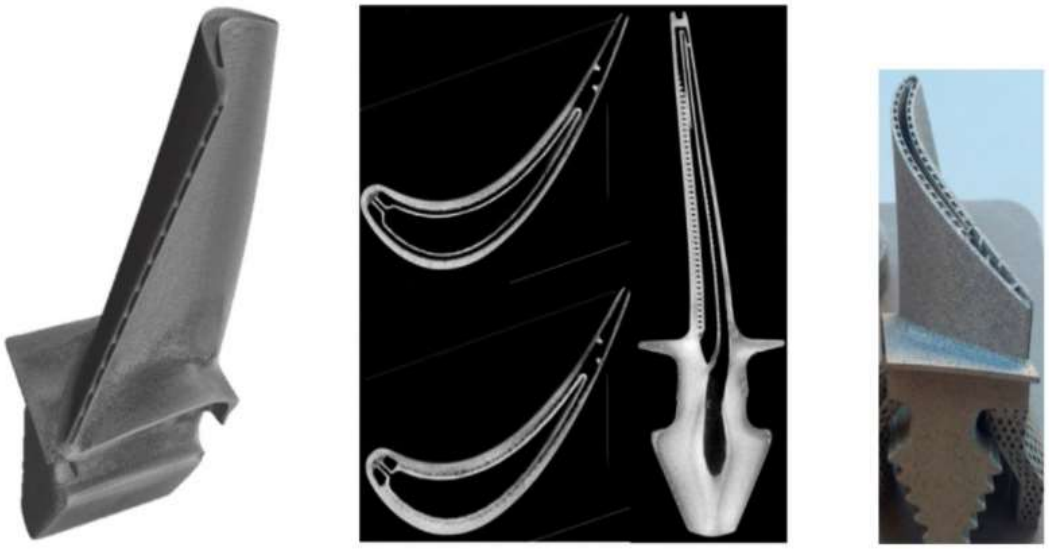


Рисунок 6.4 - Лопатка газовой турбины (SLM-технология)

SLM-технология позволяет создавать изделия с практически любой степени сложности формы из различных металлов и сплавов (рис. 6.5). Свойства некоторых из них приведены ниже:

- алюминиевый сплав ($AlSi_{10}Mg$) – хорошие прочностные и термические свойства, малый удельный вес, гибкие возможности постобработки;
- титановый сплав (Ti_6Al_4V) – превосходные механические свойства, малый удельный вес, коррозионная стойкость;
- нержавеющая сталь (SS316L) – высокая прочность, пластичность и коррозионная стойкость, хорошая тепловые свойства;
- никель-хромовый сплавинконель (IN718) – высокая прочность, термостойкость.

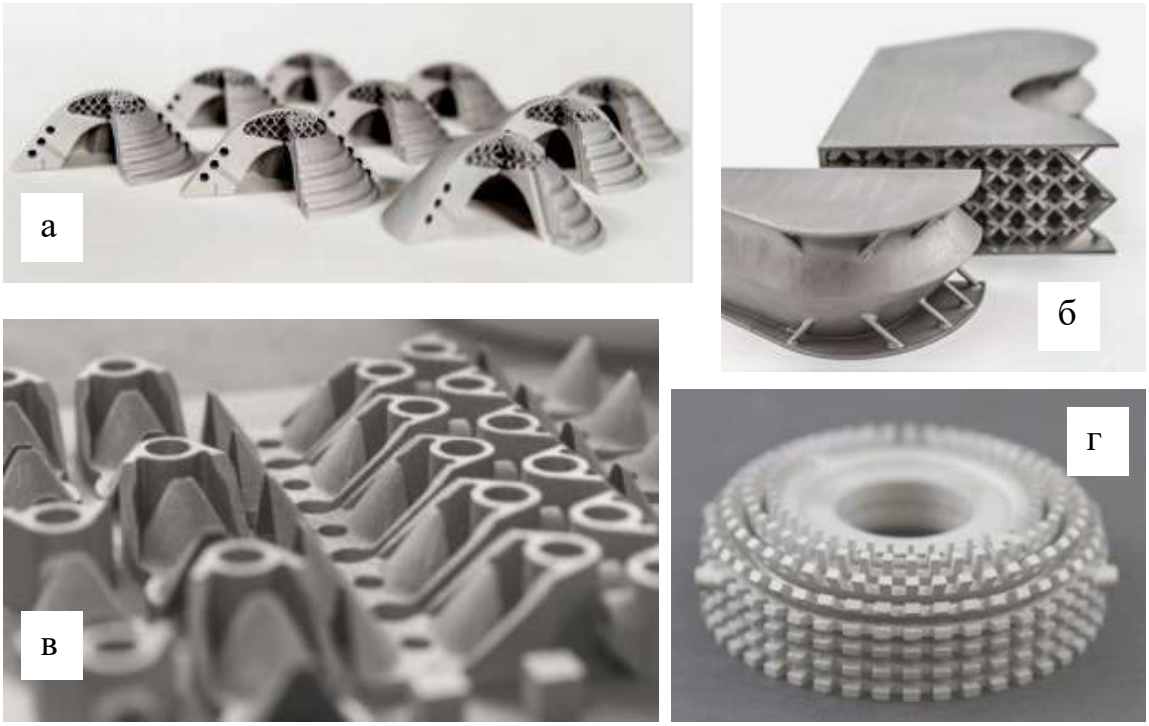


Рисунок 6.5 - Образцы изделий, созданных из различных металлов: а – $AlSi_{10}Mg$, б – Ti_6Al_4V, в – SS316L, г – IN718 (SLM-технология)

Для создания крупногабаритных и тонкостенных металлических деталей перспективно применять DLMD-технологию (рис. 6.6).

К АМ-технологиям, позволяющим печатать металлами, относятся технологии, основанные на экструзии легкоплавких металлов, например, свинца или олова (эти технологии также позволяют работать и с пластиками). Однако изделия из таких металлов обладают низкой прочностью.

В одном из вариантов АМ-технологии, основанной на экструзии волокон, предлагается использовать волокна, состоящие из стального порошка (80% вес.) и полимерного связующего (рис. 6.7). В ходе экструзии создается изделие из металлополимерного композита. При последующей термообработке изделия полимер удаляется, а образовавшийся пористый металлический каркас дополнительно спекается (по аналогии с IMLS-технологией).

Печатать металлические изделия также позволяют SL-технологии, в частности, в одном из вариантов этих технологий – UAM-технологи для построения изделий используется тонкая алюминиевая фольга, она вырезается по контуру слой за слоем и затем слои соединяются с помощью ультразвуковых воздействий.

Рисунок 6.6 - Изготовление металлических деталей по DLMD-технологии (слева показаны последовательные стадии изготовления)

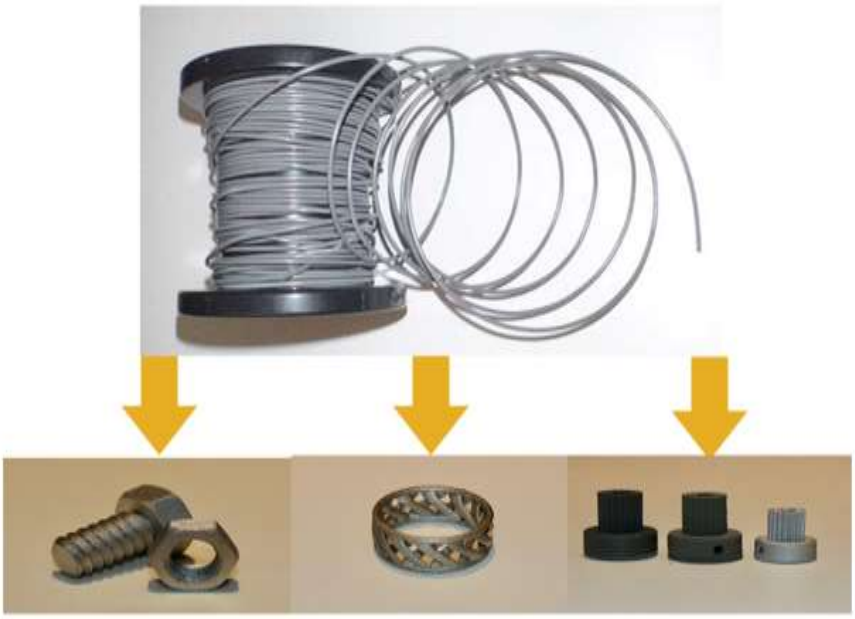


Рисунок 6.7 - Детали, изготовленные по АМ-технологии, основанной на экструзии металлополимерных волокон

6.2 Производство деталей из пластмасс

В промышленном оборудовании, а также в бытовых устройствах металлические детали активно заменяются пластмассовыми аналогами, многие из которых: шестерни, валы, шкивы, защелки, заглушки, корпуса, разъемы и т.д. можно весьма эффективно изготавливать с помощью АМ-технологий. На рис. 6.8 показаны в качестве примера пластмассовые детали стеклоочистителя заднего стекла автомобиля, созданные из полиамида с использованием SLS-технологии.

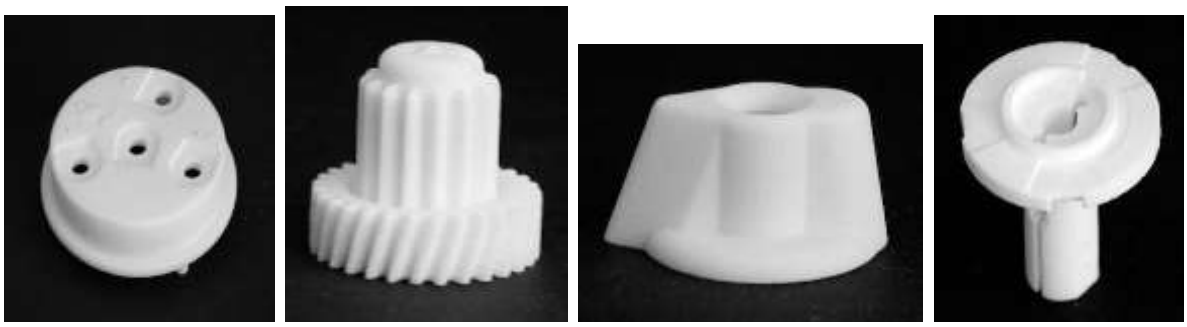


Рисунок 6.8 - Пластмассовые детали автомобиля (SLS-технология)

Для создания деталей ответственных конструкций служат технологии 3D-печати термостойких пластиков. Наиболее подходящими для таких целей являются пластики типа PPSF и ULTEM, из которых изготавливаются детали, применяемые аэрокосмической отрасли. Так, в России (БГТУ «ВОЕНМЕХ» с ООО «Современное оборудование») осуществлялась 3D-печать ряда деталей малоразмерного газотурбинного двигателя для беспилотных летательных аппаратов. В частности, с помощью FDM-технологии изготавливались крышки и колесо компрессора, диффузор, а также корпус камеры сгорания (все из термостойкого пластика) (рис. 6-9).

Рисунок 6.9 - Детали из термостойких пластиков (FDM-технология)

6.3 Производство сборок

АМ-технологии позволяют получать детали сложной конструкции, которые объединяют в себе в единое целое составные детали функционально-аналогичных сборочных единиц. Предположим, что узел машины, изготовленный по традиционным технологиям, оказывается собранным из нескольких простых деталей. При использовании АМ-технологий можно объединить все эти детали в одну 3D-печатную деталь. В результате будут сэкономлены время и затраты на сборку, а также будет уменьшена масса объединенного узла.

Ниже приведены примеры аддитивного производства сборок.

В компании 3D Systems спроектирована металлическая выхлопная труба для спортивного мотоцикла. При традиционном изготовлении она представляла собой узел, содержащий 20 деталей (рис. 6.10, а). При изготовлении с помощью металлической 3D-печати получена монолитная выхлопная труба, не требующая сборки (рис. 6.10, б).

Рисунок 6.10 - Выхлопная труба
а – детали для сборки трубы при ее традиционном изготовлении,
б – труба в виде детали, полученной с помощью АМ-технологий

Труба напечатана из титана марки Grade23 всего за 23 часа, в то время как для ее традиционного изготовления потребовались бы три недели. Время проектирования сокращено с 6 недель до 6 дней. Аддитивная технология также устранила необходимость в оснастке, креплениях, многократной сварке и проверке качества соединений. Благодаря оптимизации конструкции сократилось количество используемого материала, так что труба с типичной толщиной стенки 0,5 мм, изготовленная путем 3D-печати, оказалась на 25% легче, чем труба, изготовленная традиционным путем.

В компании General Electric изготовлена с помощью SLM-технологии топливная форсунка (рис. 6.11) в виде одной детали. Такая же форсунка, изготовленная традиционным путем, состоит из 20

деталей. Благодаря оптимизации конструкции форсунки при ее аддитивном изготовлении было достигнуто снижение массы на 25%.

Рисунок 6.11 - Топливная форсунка

Возможности сокращения числа единиц в сборке демонстрируются на рис. 6.12 на примере изготовления смесителя жидкости с газом с использованием SLM-технологии. Смеситель, созданный по традиционной технологии, представляет собой узел, состоящий из 12 деталей. Для установки внутрь него фильтра необходимо деталь его конструкцию разъемной, кроме того, для его изготовления требуются фланцы для крепления, прокладки, болты и т.д. В результате топологической оптимизации и 3D-печати получается одна цельная деталь вместо 12 сборных компонентов. Как следствие, упрощается конструкция, уменьшается расход металла, не требуется операция сборки.

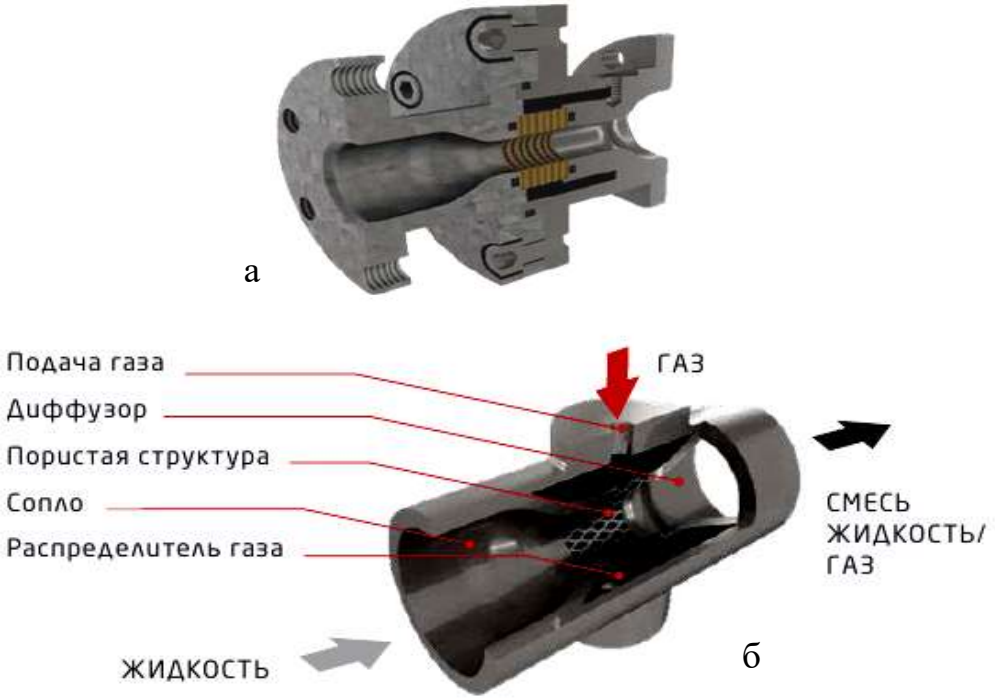
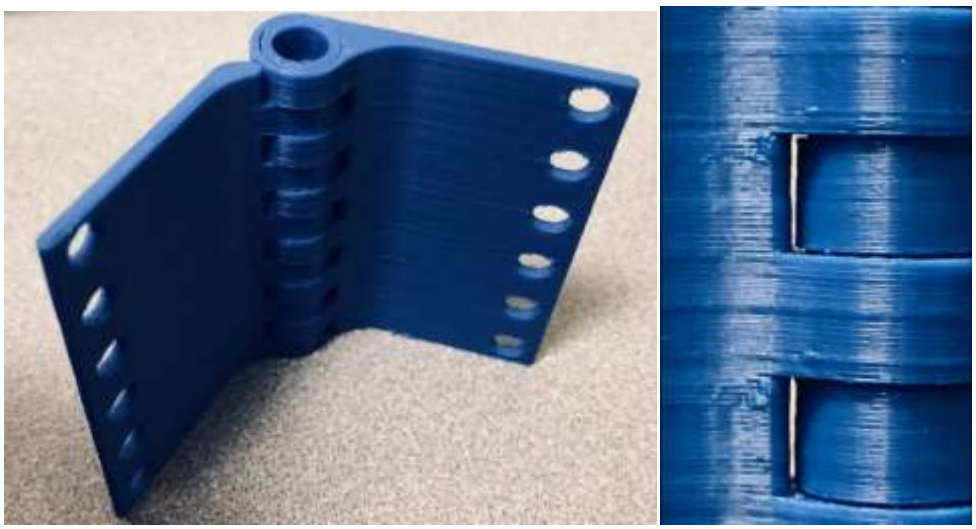


Рисунок 6.12 - Смеситель жидкости с газом, изготовленные по традиционной технологии (а) и SLM-технологии (б)

6.4 Производство подвижных соединений

АМ-технологии обеспечивают уникальные возможности изготавливать сборочные единицы с подвижными соединениями.

На рис. 6.13 показана конструкция шарнирной дверной петли, состоящей из двух подвижных частей (пластинок), соединенных посредством суставов. Конструкция изготовлена из пластика по FDM-технологии. Особенность 3D-печати такой конструкции заключается в формировании негативного пространства (воздушных зазоров) между подвижными частями и соединяющим их штифтом. В процессе печати это негативное пространство заполняется поддерживающим материалом, который затем растворяется в промывочной ванне.



а б

Рисунок 6.13 - Дверная петля, состоящая из двух подвижных частей (а) и элемент дверной петли (между подвижными частями и соединяющим их штифтом видны воздушные зазоры) (FDM-технология) (б)

Подобным путем можно создавать разнообразные механизмы, содержащие детали, между которым имеются подвижные соединения. На рис. рис. 6.14 показан в качестве примера такого рода механизм, изготовленный по SLS-технологии.

6.5 Сочетание аддитивных и традиционных технологий изготовления изделий

Гибридный подход к изготовлению деталей машин предполагает выполнение на одном и том же оборудовании и 3D-печати, и традиционной обработки. Наиболее распространено интегрирование лазерных металлопорошковых АМ-технологий и технологий обработки металлов резанием. Благодаря такой интеграции обеспечивается более высокая точность изготовления изделий.

Рисунок 6.14 - Механизм с подвижными частями

Так, на рис. 6.15 показана типичная схема совместного проведения лазерной наплавки и фрезерования посредством оснащения фрезерного станка с ЧПУ лазерной наплавочной головкой.

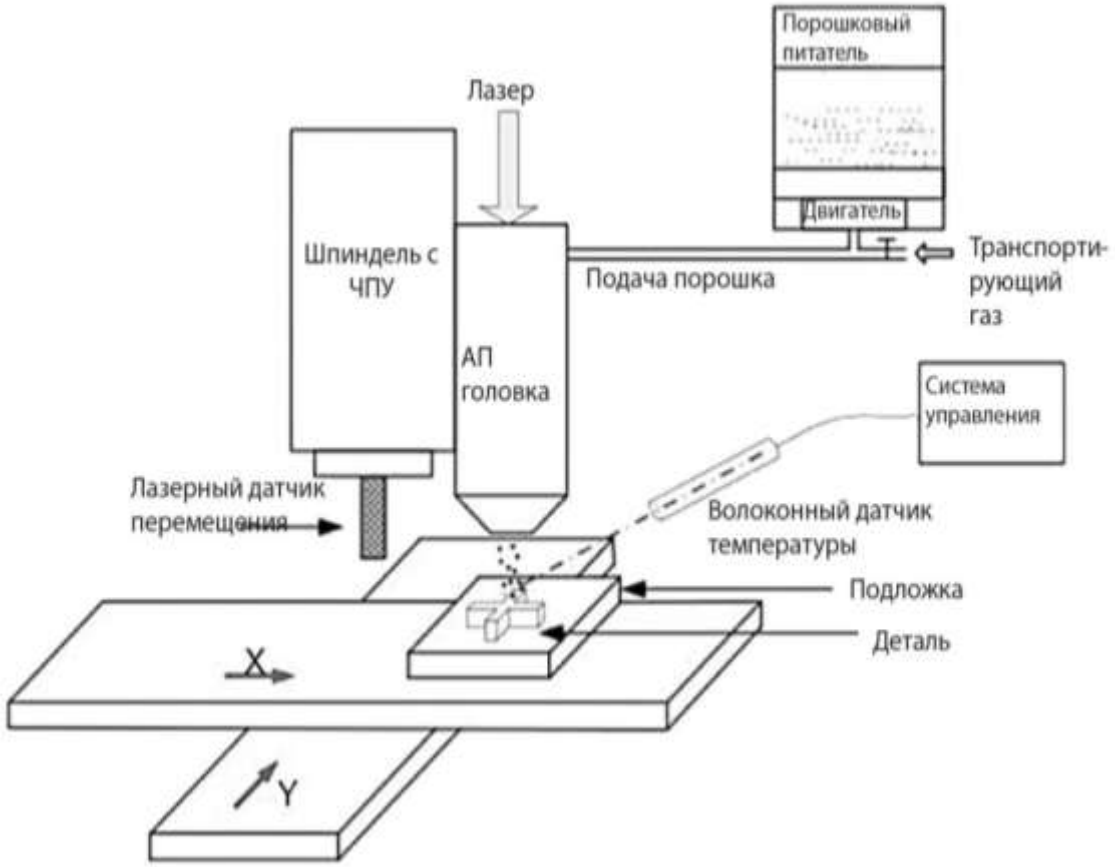


Рисунок 6.15 - Конструкция гибридного станка, оснащенного фрезерным шпинделем и головкой для лазерной наплавки

Крупнейшие компании-производители станков начали создавать гибридные обрабатывающие центры, в которых совмещаются функциональные возможности станка с ЧПУ для металлообработки и установки для лазерной наплавки.

Компания Okuma (Япония) разработала серию станков LASER EX, в которых традиционные технологии обработки резанием (фрезерование, точение, шлифование, сверление, зубообработка) дополнены лазерно-наплавочной DED-технологией.

Компания Mitsubishi (Япония) выпускает 3D-принтер LUMEX Avance-25, который объединяет возможности SLS-технологии и фрезерования: он спекает последовательно наносимые слои порошка, одновременно обрабатывая их поверхности фрезой, в результате создаются металлические детали сложной формы с хорошим качеством поверхности.

Рис. 6.16 демонстрирует функциональные возможности гибридного обрабатывающего центра, созданного фирмой ИРЭ-Полюс (Россия) на базе металлообрабатывающего станка с ЧПУ путем его дооснащения лазерным устройством.

Рисунок 6.16 - Селективная послойная наплавка с одновременной механической обработкой

Все большее применение начинает получать изготовление изделий на основе использования сочетаний АМ-технологий с различными технологиями поверхностного упрочнения послойно формируемых слоев строительного материала.

Примеры таких сочетаний рассмотрены ниже.

На рис. 6.17 показан гибридный аддитивный процесс, в котором каждый слой порошка, последовательно формируемый с помощью LENS-технологии, упрочняются лазерной ударной обработкой. После упрочнения одного слоя наносится очередной слой, циклы повторяются до полного построения изделия.

Техническая суть лазерного ударного упрочнения (лазерного наклепа) состоит в следующем. На обрабатываемую поверхность наносят непрозрачный для лазерного излучения слой с низкой температурой испарения: черной краской или металлической фольгой. Поверх него наносят прозрачный слой (обычно слой воды). Энергия лазерного импульса поглощается непрозрачным слоем, что вызывает его нагрев и испарение с образованием высокотемпературной плазмы, которая ограничена снизу поверхностью материала, а сверху – прозрачным слоем.

Из-за ограниченности объема плазмы, давление газа резко возрастает, в результате чего создается ударная волна, вызывающая в материале сжимающие напряжения.

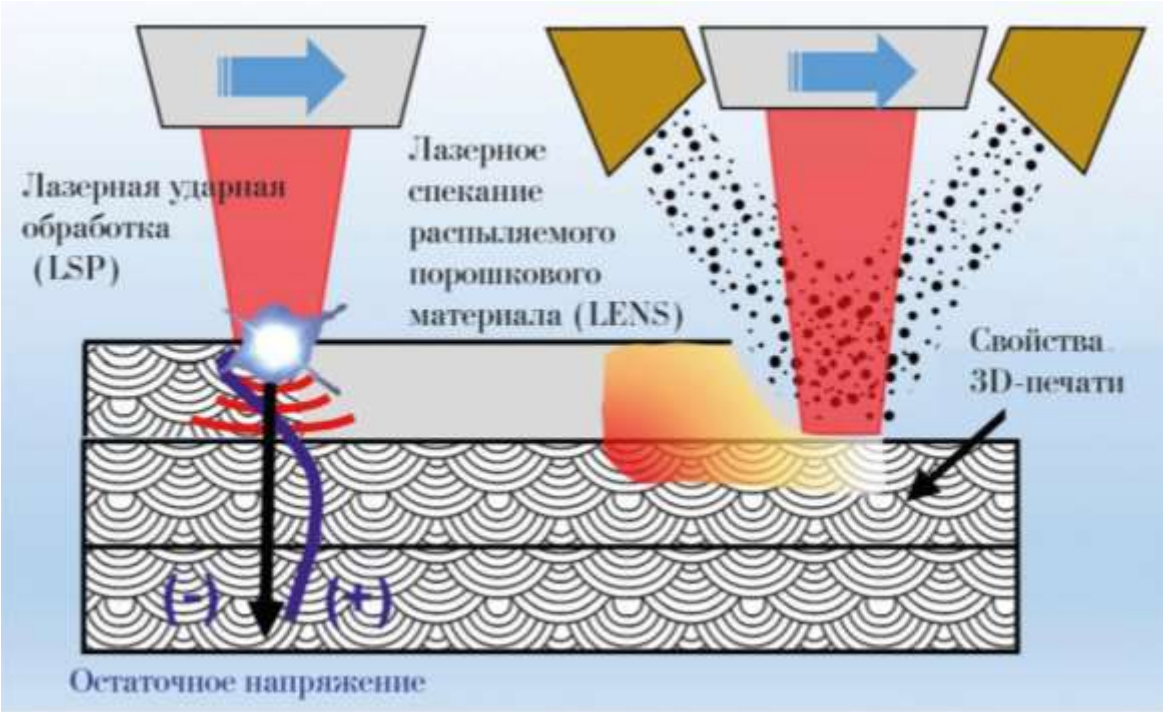


Рисунок 6.17 - Гибридный аддитивный процесс в сочетании с лазерной ударной обработкой

На рис. 6.18 показан гибридный аддитивный процесс, в котором слои порошка, формируемые с помощью LENS-технологии, упрочняются ультразвуковой обработкой, способствующей снятию остаточных напряжений и измельчению зерен в обрабатываемом материале.

На рис. 6.19 показан гибридный аддитивный процесс, в котором слои порошка, формируемые с помощью LENS-технологии, упрочняются прокаткой, в результате которой происходит деформационное упрочнение обрабатываемого материала, а также сглаживание поверхности.

Для реализации гибридных АМ-технологий применяются различные варианты специально разработанного оборудования.

В концерне «Калашников» (Россия) создан гибридный фрезерно-наплавочный обрабатывающий центр IZH H800, сочетающий аддитивные технологии и механическую обработку (рис. 6. 20). Соответственно, он состоит из двух основных модулей: 5-осевого фрезерного станка и наплавочного лазерного комплекса.

Фирма Matsuura Machinery (Япония) выпустила на рынок гибридную установку Matsuura LUMEX Avance-25 для производства высокоточных матриц и штампов (рис. 6.21).

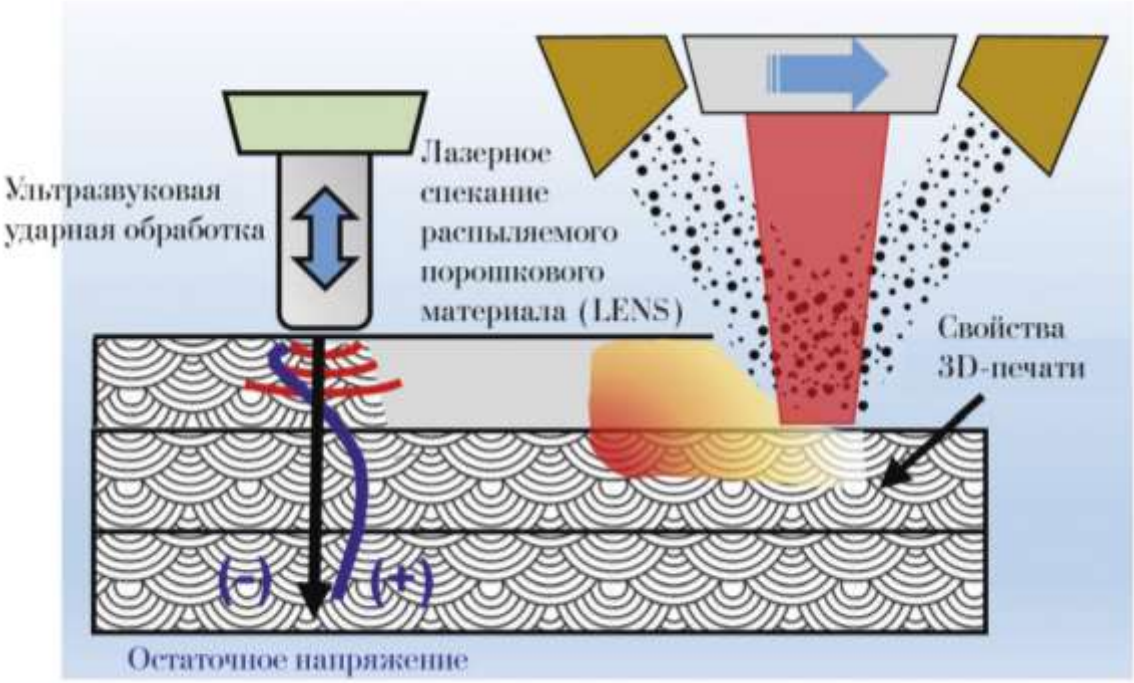


Рисунок 6.18 - Гибридный аддитивный процесс в сочетании с ультразвуковой обработкой

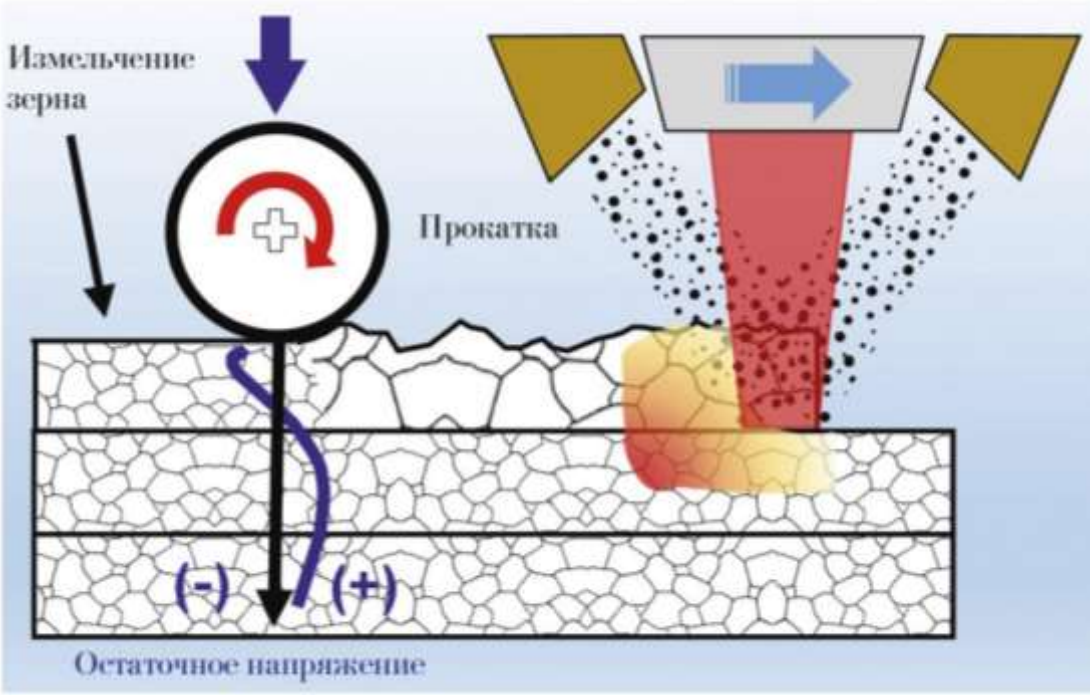


Рисунок 6.19 - Гибридный аддитивный процесс в сочетании с прокаткой

а б

Рисунок 6.20 - Обрабатывающий центр IZH H800
а – внешний вид, б – зона построения

Рисунок 6.21 - Установка Matsuura LUMEX Avance-25

Процесс изготовления состоит в следующем. Сначала последовательно формируются слои металлического порошка (сталь, титан) толщиной 50 мкм (рис. 6.22, а), каждый слой подвергается селективному лазерному спеканию (рис. 6.22, б). После того как толщина строящегося изделия достигнет 0,5 мм (после наращивания 10 слоев) проводится обработка изделия фрезой (рис. 6.22, в), благодаря чему достигается высокая размерная точность и качество поверхности.

Аналогичные гибридные установки, использующие лазерную наплавку и фрезерование, разрабатываются и производятся другими фирмами.

6.6 Сочетания разных аддитивных технологий изготовления изделий

В ряде случаев изготовления изделий оказывается эффективным совместное использование двух разных видов АМ-технологий.

Например, детали машин могут быть произведены по SLM-технологии в сочетании с моделированием, осуществляемым по FDM-технологии.

При производстве крупногабаритных деталей со сложной геометрией оказывается целесообразным сочетать SLM- и DED-технологии, используя их преимущества: SLM-технология позволяет создавать изделия с высокой точностью, в то время как DED-технология обеспечивает быстрое построение крупных изделий.

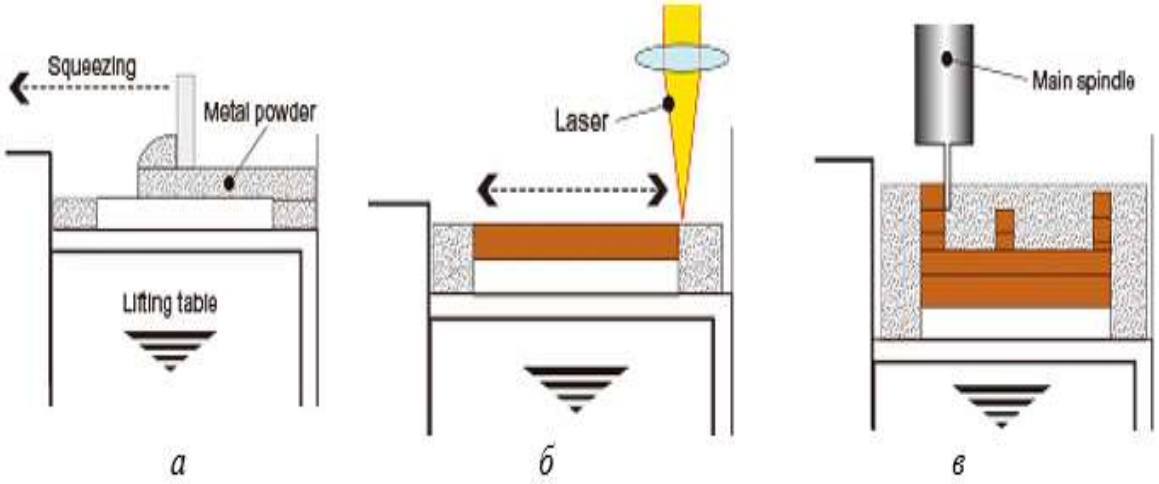


Рисунок 6.22 - Схема изготовления изделия на установке Matsuura LUMEX Avance-25

6.7 Практика производственного освоения аддитивных технологий

АМ-технологии получили заметное распространение для прямого изготовления деталей машин сравнительно недавно – в последние несколько лет. Ниже представлены некоторые характерные примеры промышленного освоения этих технологий.

Компания Ford (США) с 2015 г. приступила к созданию с помощью аддитивных технологий деталей двигателя на гоночном автомобиле EcoBoost.

Компания Kia (Южная Корея) с 2016 г. начала выпускать внедорожник Telluride, в котором методами 3D-печати изготавливаются внутренние элементы (приборная панель и др.).

Компании Honda и Kabuku (Япония) в 2016 г. совместно создали электрический фургон, в котором детали кузова и багажная зона созданы с использованием 3D-принтера.

Компания Daimler Trucks (Германия) с 2016 г. начала применять аддитивные технологии в производстве пластиковых запасных деталей грузовиков, включая пружинные колпачки, воздуховоды и кабельные каналы, зажимы, крепления и элементы управления, а с 2017 г. – в производстве металлических запасных деталей.

Компания Bugatti (Франция) в 2018 г. объявила о применении 3D-печати для создания тормозных суппортов из титана на суперкаре Chiron.

Практика промышленного применения аддитивных технологий показывает, что они позволяют повысить производительность и снизить себестоимость производства, а также улучшить качество создаваемых деталей, в том числе за счет совершенствования их конструкции.

Компания Rolls-Royce (Великобритания) в 2014 г. приняла решение об увеличении числа деталей авиационных двигателей, изготовленных с использованием АМ-технологий. В результате проведенных в компании исследований были отмечены повышение скорости производства в 10-15 раз, снижение массы деталей до 50%, экономия дорогостоящих материалов и возможность изготовления более совершенных и легких конструкций сложной формы из металлов и керамики.

Компания General Electric (США) с 2015 г. освоила серийное производство топливных форсунок из титана для авиадвигателей с применением аддитивных технологий. На сегодняшний день годовая программа выпуска насчитывает тысячи таких форсунок. Для их изготовления используется более 40 3D-принтеров. Получаемая путем 3D-печати форсунка представляет собой одну деталь, в то время как раньше это был узел, собираемый из двадцати деталей (с применением пайки и сварки), закупаемых у разных поставщиков. Мало того, что упростился технологический процесс, форсунка стала на 25% легче и служит в пять раз дольше по сравнению со своей предшественницей, которая изготавливалась по традиционной технологии.

Компания BMW (Германия) использует 3D-печать для создания верхней крышки для автомобиля i8 Roadster, которая обладает большей прочностью и меньшим весом по сравнению с ее предшественницей.

Компания SiemensAG (Германия) производит с помощью 3D-печати горелки для газовой турбины, а также лопатки, устанавливаемые в турбине. Эти лопатки, изготовленные из никелевого сплава, выдерживают высокие давления, температуры и центробежные силы, возникающие при работе турбины, а их конструкция имеет внутреннюю систему охлаждения сложной геометрии.

Контрольные вопросы

1. Какие виды аддитивных технологий, позволяющих печатать металлами, применяются при производстве деталей машин?
2. Чем различаются аддитивные технологии, основанные на прямом и непрямом лазерном спекании металлических порошков?
3. Почему SLM-технологии наиболее широко применяются при производстве деталей машин?
4. Приведите примеры пластиковых деталей машин, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий.
5. В чем состоит сущность аддитивного производства сборок?
6. Поясните, каким образом можно изготавливать сборочные единицы с подвижными соединениями благодаря использованию аддитивных технологий.
7. Приведите примеры сочетания аддитивных и традиционных технологий изготовления деталей машин.
8. В чем заключается техническая суть лазерного ударного упрочнения?
9. Приведите примеры сочетания разных аддитивных технологий изготовления деталей машин.

7. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОСНАСТКИ И ИНСТРУМЕНТА

7.1 Производство формообразующей оснастки

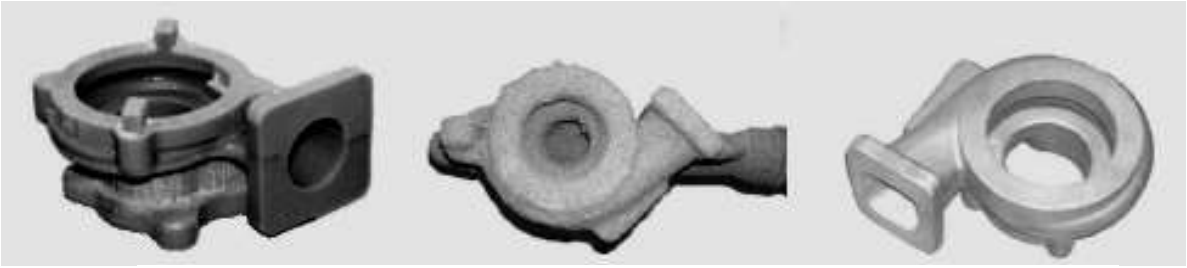
При изготовлении деталей, сборке, контроле качества и других работах широко используется разнообразная технологическая оснастка. Ее применяют как в массовом, так и в единичном производстве. Благодаря наличию оснастки увеличивается производительность и гибкость оборудования, расширяются его функциональные возможности. Особенно важно иметь оснастку на малых предприятиях, где приходится выполнять большое количество индивидуальных заказов на изготовление изделий с разными конструктивными характеристиками.

Однако стоимость оснастки, создаваемой с использованием традиционных технологий довольно высока (обычно она гораздо выше стоимости изготавливаемой с ее помощью детали), а на ее создание затрачивается большое время. Наиболее трудоемким является изготовление специальной формообразующей оснастки, которая требуется для получения деталей, например, путем литья или штамповки. Для снижения стоимости оснастки, ускорения и, по возможности, автоматизации процесса ее перспективно создавать с помощью АМ-технологий.

Ниже рассмотрены некоторые типичные примеры применения АМ-технологий для производства литейной и штамповой оснастки.

Литейная оснастка

Для того чтобы получить единичную металлическую литую деталь, сначала с помощью 3D-принтера изготавливается литейная модель детали, на которую затем наносится керамическая оболочка. В эту оболочку заливается расплавленный металл и формируется готовая литая деталь (при этом литейная модель выжигается или выплавляется) (рис. 7.1).



а б в

Рисунок 7.1 - Основные стадии получения литой детали с

помощью АМ-технологий а – АМ-модель, б – керамическая оболочка, в – металлическая отливка

Выжигаемые модели получают из полистирола (SLS-технология), полиметилметакрилата (Ink-Jet-технология), фотополимеров (SLA-технология). Выплавляемые модели получают из модельного материала на основе литьевого воска с фотополимерным связующим (MJM-технология). Также выплавляемые модели можно получать из ПВХ-пленок по LOM-технологии. На рис. 7.2 и 7.3 показаны литые алюминиевые детали двигателя внутреннего сгорания (ДВС), изготовленные с использованием АМ-моделей.

Рисунок 7.2 - Головка цилиндра ДВС: SLS-модель (слева) и отливка

Рисунок 7.3 - Передняя крышка ДВС: SLA-модель (слева) и отливка

Для того чтобы получить небольшую партию литых металлических деталей, с помощью 3D-принтера изготавливается прототип детали (мастер-модель) из какого-либо материала (термопластика АБС, полистирола, воска, фотополимера или др.), который затем заливается силиконом. После застывания силикона образуется эластичная форма, которая разрезается на две половинки (рис. 7.4). В полученную разъемную форму заливается литьевой воск, в результате чего получается литейная модель. Такую форму можно использовать многократно. Обычно данный способ литья применяют для получения 20-50 литых деталей.

АМ-технологии применяются для изготовления песчаных литейных форм. Их получают с помощью SLS-технологии из литейного (силикатного или циркониевого) песка, плакированного полимером, играющим роль связующего (рис. 7.5), или с помощью Ink-Jet-технологии, когда связующее вещество подается каплями на последовательно формируемые слои песка (рис. 7.6).

Рисунок 7.4 - Мастер-модель и полученная с ее помощью силиконовая форма

Рисунок 7.5 - Песчано-полимерная форма, полученная с помощью SLS-технологии

Рисунок 7.6 - Песчано-полимерная форма, полученная с помощью

Ink-Jet-технологии

АМ-технологии позволяют создавать непосредственно металлическую оснастку. Пример тому – деятельность компании InssTek (Южная Корея), которая производит пресс-формы из стали и никель-молибденовых сплавов с помощью DLMD-технологии. Пресс-формы предназначены для литья алюминиевых головки блоков цилиндров двигателя.

Используя DLMD-технологию, за счет варьирования состава осаждаемых металлических порошков, можно получать пресс-формы, в которых рабочая поверхность выполнена из инструментальной стали, а конформные каналы охлаждения – из меди, причем сталь плавно переходит в медь. Такие пресс-формы дают возможность существенно сократить время охлаждения детали при литье.

Для непосредственного изготовления металлической оснастки можно весьма эффективно применять SLM-технологию. Примером тому является создание с ее помощью стального сердечника вставки для пресс-форм с системой конформного охлаждения в виде встроенных извилистых каналов, расположенных вблизи стенок пресс-форм (рис. 7.7).

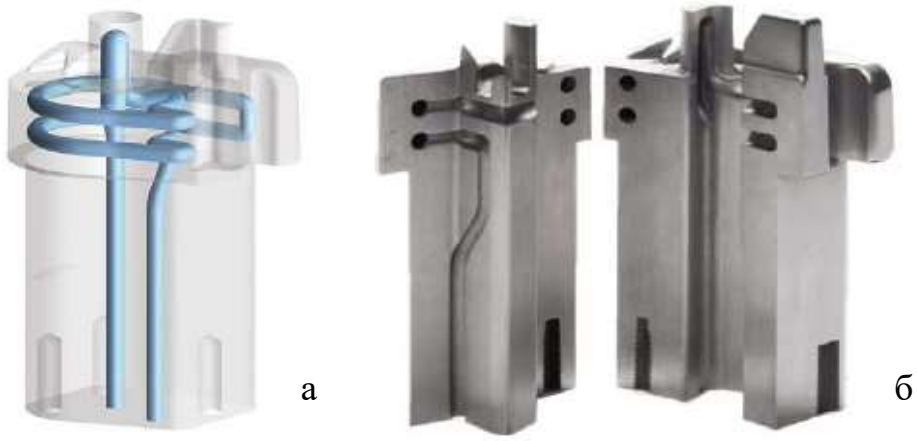


Рисунок 7.7 - Сердечник вставки для пресс-форм со встроенными каналами

На производственных предприятиях, применяющих АМ-технологии, довольно часто имеют место сочетания АМ-технологий изготовления оснастки или инструмента и традиционных технологий изготовления изделий. Примером успешного применения такого гибридного подхода в производстве является деятельность литейного завода ACTech (Германия). Завод оснащен передовым технологическим оборудованием, включая металлообрабатывающие станки с ЧПУ, плавильное, литейное и термическое оборудование,

измерительную технику, и, кроме того, были АМ-машины для создания песчаных форм (от немецкой компании EOS). Клиентами завода являются многочисленные автомобильные и авиационные фирмы разных стран мира. Для того чтобы изготовить необходимое изделие, заказчику достаточно передать 3D-файл этого изделия и описать требования к его изготовлению (используемый материал, количество экземпляров). Сроки выполнения заказа от 7 дней до 8 недель – в зависимости от того, что будет изготовлено: отливка или полностью обработанная деталь. Анализ работы завода показывает, что около 20% заказов – единичные детали, около 40% – заказы на 2-5 деталей; почти половина производимых отливок из чугуна, около трети – из алюминия, остальное – сталь и другие сплавы.

С помощью АМ-технологий также создают непосредственно пластиковые пресс-формы для инжекционного литья пластиков, а также для вакуумной формовки. Пресс-формы получают из температуростойких пластиков с добавками керамического порошка по технологии MOVINGLIGHT (затвердевание фотополимеров под действием ультрафиолетового излучения, создаваемого проектором). Используя такие пресс-формы, можно получать отливки из полипропилена, полиэтилена, полистирола, полиамида, АБС-пластика и т.п.

Штамповая оснастка

Для изготовления металлической штамповой оснастки можно применять АМ-технологии, относящиеся к категориям PBF, DED и SL, у которых роль строительных металлов играют металлы.

Поскольку во многих случаях детали получают путем штамповки, для которой требуются небольшие усилия, становится возможным заменять металлическую штамповую оснастку пластиковой оснасткой, которую эффективно создавать с помощью АМ-технологий, что позволяет снизить длительность и стоимость процессов штампового производства.

На рис. 7.8, а показаны элементы штамповой оснастки (матрицы и пуансоны), изготовленные из жёсткой фотополимерной смолы Formlabs Rigid 4000 Resin по SLA-технологии, а на рис. 7.8, б – детали, полученные штамповкой листового металла на листогибочном прессе с использованием этой оснастки.

а

б

Рисунок 7.8 - Штамповая оснастка (а) и отштампованные детали (б)

На рис. 7.9 и 7.10 показаны аналогичные элементы штамповой оснастки, предназначенные для штамповки деталей из листового металла. Оснастка изготовлена из термопластика PLAпоFDM-технологии.

Специальная оснастка

Необычная оснастка, предназначенная для крепления деталей при сверлении, показана на рис. 7.11. Она изготовлена из термопластика ABS поFDM-технологии.

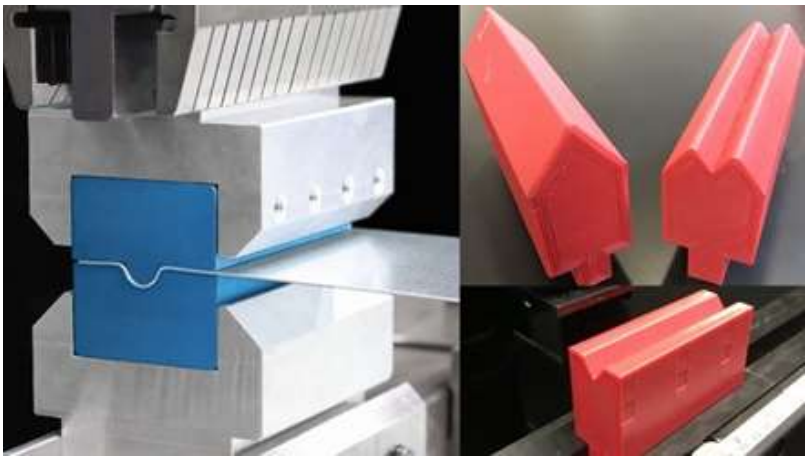


Рисунок 7.9 - Штамповая оснастка

Рисунок 7.10 - Штамповая оснастка (а) и отштампованные детали (б)

Рисунок 7.11 - Оснастка для крепления деталей при сверлении

7.2 Производство инструмента

Электроды-инструменты

Применение копировально-прошивных электроэрозионных станков сдерживается ограниченными технологическими возможностями изготовления сложнопрофильных электродов-инструментов (ЭИ) цельной конструкции. При традиционном изготовлении их конструкция разделяется на элементарные участки, каждый участок изготавливается по отдельности, а затем они собираются в один инструмент. Изготовление сложнопрофильных ЭИ существенно упрощается благодаря применению АМ-технологий.

Так, сначала с помощью SLA-технологии создается прототип ЭИ, на основе которого затем формируется модельный комплект из литейного воска. Далее по обычной литейной технологии получается отливка ЭИ. Другой путь получения ЭИ – создание заготовки ЭИ с помощью SLA-технологии и последующее нанесение на нее

токопроводящего покрытия – как в рабочей зоне, так и в зоне подвода электрического тока. Кроме того, возможно прямое изготовление ЭИ – на основе SLM-технологии. С помощью АМ-технологий можно создавать медные ЭИ с микроэлементами на рабочей поверхности, что позволяет их использовать для микроэлектроэрозионной обработки.

Режущие инструменты

АМ-технологии, позволяют получать высокоэффективные режущие инструменты, которые невозможно создавать с помощью традиционных технологий.

Наибольшее применение находят SLM-технологии, которые дают возможность получать режущий инструмент, прочный снаружи и пластичный внутри. Также с их помощью можно выборочно задавать параметры определенных участков детали с последующей закалкой их поверхности, формируя при этом внутреннюю часть в виде ячеек или сот. Кроме того, в инструменте, изготовленном по SLM-технологии, можно формировать спиральный канал для подачи смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), что позволяет более эффективно охлаждать его.

По мнению специалистов компании «Komet Group» (Германия), с помощью SLM-технологий можно воспроизводить любую по сложности геометрию режущего инструмента. Так, эта компания на основе использования SLM-технологий освоила производство фрез, в которых можно располагать большее количество режущих зубьев с оптимизированной геометрией. При этом скорость подачи таких инструментов, в частности, концевых и торцевых фрез увеличилась на 50 %. Более того, внутри корпуса режущей головки стало возможным формирование каналов с оптимизированным поперечным сечением для подвода СОЖ в требуемых местах без снижения прочности фрез и с максимальным эффектом их охлаждения. Различные виды фрез, выпускаемых компанией «Komet Group» с помощью АМ-технологий, показаны на рис. 7.12.

Рисунок 7.12 - Фрезы, полученные с помощью SLM-технологий

Еще один пример успешного применения АМ-технологий для изготовления режущих инструментов – деятельность компании Mapal (Германия), которая, выпускает необычные по конструкции сверла по гибридной технологии: хвостовик инструмента обрабатывается традиционным способом, а режущая часть – с помощью SLM-технологии (рис. 7.13). Преимуществом таких сверл является их принципиально новая геометрия, улучшающая их рабочие характеристики. Основная их особенность состоит в том, что канал подвода СОЖ в них имеет спиральную форму сравнению с центральным каналом в традиционно изготавливаемых сверлах, что повышает эффективность охлаждения за счет ускорения потока СОЖ. Кроме того, спиралевидный канал охлаждения проходит параллельно винтовой канавке, улучшая стабильность центральной части сверла. Более эффективному охлаждению также способствует профиль канала, который вместо круглой формы имеет слегка треугольную форму, что вызывает повышение скорости потока.

Рисунок 7.13 - Сверло, полученное с помощью АМ-технологий

Применение АМ-технологий значительно снижает сроки изготовления режущего инструмента, что особенно заметно при использовании DLMD-технологии, позволяющей сравнительно быстро и дешево создавать высокопроизводительные стальные фрезы и другие инструменты (рис. 7.14).

Рисунок 7.14 - Фреза, полученная с помощью DLMD-технологии

Аддитивное производство инструмента, наряду с достоинствами, имеет и недостатки. В частности, ограниченная точность 3D-печати пока не может полностью устранить механическую обработку при изготовлении инструмента, например, шлифование посадочных отверстий или наружных поверхностей хвостовиков, фрезерование гнезд режущих пластин или нарезание резьбы в отверстиях. С учетом этого применяются специально разработанные гибридные станки, осуществляющие как традиционную обработку резанием, так и 3D-печать.

Контрольные вопросы

1. В чем состоят преимущества применения аддитивных технологий для изготовления оснастки и инструмента?
2. Почему наиболее эффективно применять аддитивные технологии для изготовления формообразующей оснастки?
3. Приведите примеры применения аддитивных технологий для производства литейной оснастки.
4. Приведите примеры применения аддитивных технологий для производства штамповой оснастки.
5. Какие виды аддитивных технологий применяются для изготовления литейных выжигаемых моделей?
6. Какие виды аддитивных технологий применяются для изготовления литейных выплавляемых моделей?
7. Какие виды аддитивных технологий применяются для изготовления литейных песчаных форм?
8. Какие виды аддитивных технологий применяются для непосредственного изготовления металлической оснастки?
9. Приведите примеры применения сочетаний аддитивных и традиционных технологий для изготовления оснастки и инструмента.
10. Какие виды аддитивных технологий применяются для изготовления металлической штамповой оснастки?
11. В каких случаях можно применять пластиковую штамповую оснастку взамен металлической штамповой оснастки?
12. Какие виды аддитивных технологий применяются для изготовления пластиковой штамповой оснастки?
13. Какие виды аддитивных технологий можно применять для изготовления электродов-инструментов?
14. Какие виды аддитивных технологий можно применять для изготовления режущих инструментов?

8. АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РЕМОНТА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

8.1 Роль аддитивных технологий в ремонте машин

АМ-технологии могут играть разную роль в ремонте машин. С одной стороны, они используются для изготовления запасных деталей, с другой – для ремонта (восстановления) изношенных (поврежденных) деталей.

Запасные детали необходимо иметь в наличии в тех случаях, когда заменяемые ими вышедшие из строя детали не подлежат восстановлению либо когда это восстановление является нецелесообразным, например, чрезмерно длительным или дорогостоящим.

Типовая схема постадийного ремонта машины путем замены детали, вышедшей из строя, запасной деталью, изготавливаемой с использованием АМ-технологий, показана на рис. 8.1.

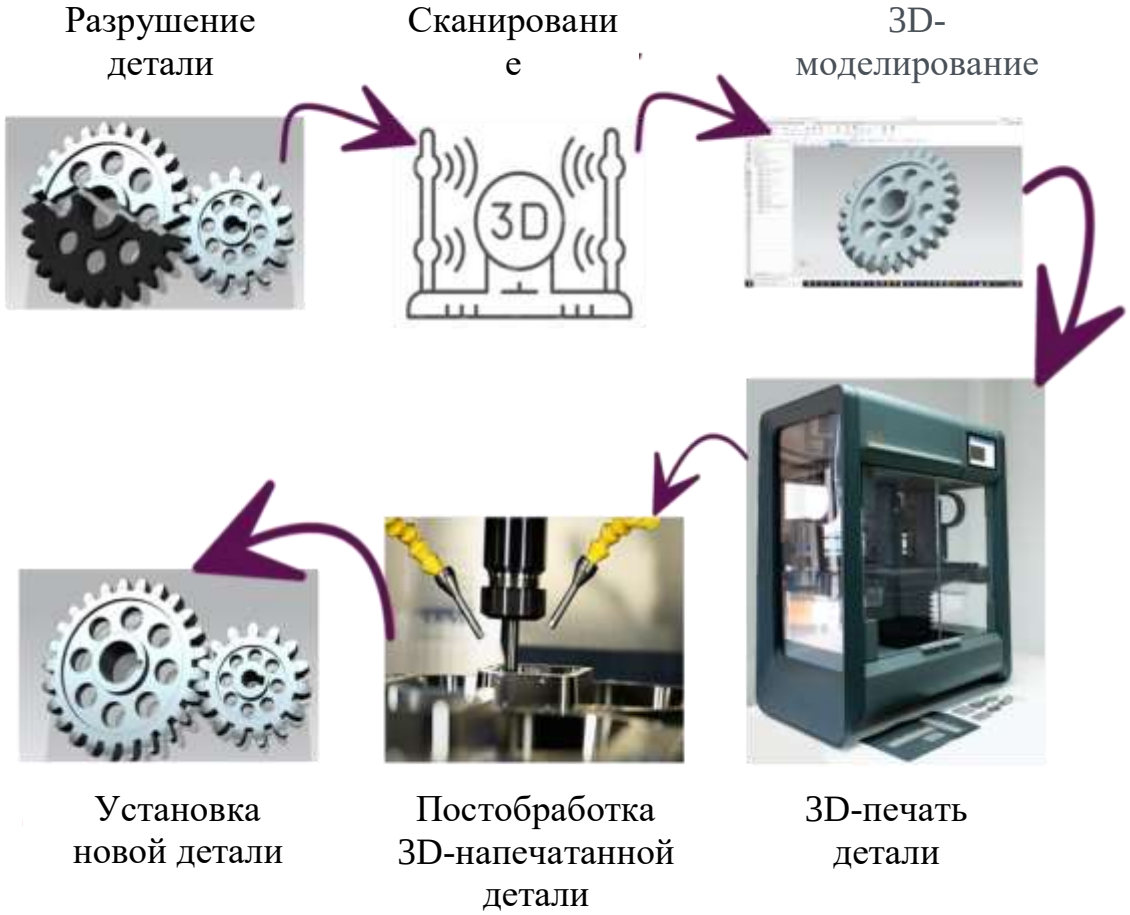


Рисунок 8.1 - Схема ремонта машины с использованием запасной детали, изготовленной по АМ-технологии

Процесс аддитивного производства запасных деталей, необходимых для ремонта машин, в принципе ничем не отличается от процесса аддитивного производства деталей, необходимых для производства машин в целом.

Этот процесс может быть как прямым, когда АМ-технологии позволяют непосредственно изготавливать практически готовую деталь, так и непрямым, когда АМ-технологии служат для создания оснастки или инструмента, с помощью которых затем изготавливают деталь.

Особенности применения АМ-технологий для производства деталей машин, включая запасные детали, рассмотрены в разделе 6, а для производства оснастки или инструмента – в разделе 7.

Ниже рассмотрены особенности применения АМ-технологий для ремонта деталей машин.

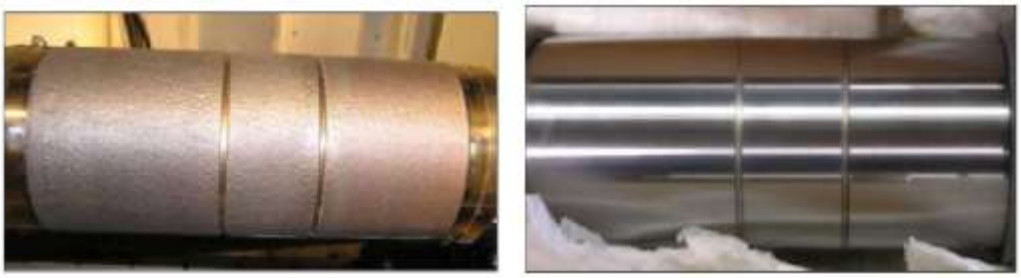
8.2 Ремонт металлических деталей

Среди различных традиционных технологий восстановления изношенных металлических деталей наиболее широко применяются технологии наплавки, в частности, лазерная наплавка, которую можно эффективно использовать для ремонта крупногабаритных деталей сложной формы. При этом наплавляемый слой по плотности и прочности не уступает основному материалу, а при специальном подборе присадочного порошка оказывается значительно лучше него, что способствует повышению ресурса работы восстановленной детали. Соответственно, для восстановления металлических деталей используются в основном АМ-технологии, основанные на процессах селективной лазерной наплавки, в частности, DLMD-технология и подобная ей LENS-технология.

Согласно LENS-технологии присадочный металлический порошок доставляется в зону наплавки одновременно с лучом лазера. Регулируя состав наносимого порошка (за счет использования нескольких питателей), скорость перемещения и размер пятна лазерного луча, а также защитную атмосферу в зоне расплава, можно обеспечивать получение необходимой структуры наплавленной зоны. LENS-оборудование выпускается в виде автономных установок или же модульных установок на базе имеющихся станков с ЧПУ или роботов.

На рис. 8.2 показан процесс восстановления изношенного вала с использованием LENS-технологии. Реализация этого процесса с помощью традиционной наплавки электродом может привести к недопустимым термическим деформациям вала, а с помощью термического напыления – к отслоению наносимого покрытия из-за недостаточно прочного сцепления с основой.

Как видно на рис. 8.2, вал после наплавки слоя металла подвергается традиционной механической обработке для повышения качества поверхности (снижения шероховатости). Подобный пример применения механической обработки после восстановления вала селективной лазерной наплавкой показан на рис. 8.3, где на изношенную поверхность вала из марки стали 9ХС нанесен порошок Co-28Cr-4,5W.



а б

Рисунок 8.2 - Восстановление изношенного вала: после нанесения слоя (а); после финишной обработки (б)

Рисунок 8.3 - Восстановление изношенного вала

LENS-технология позволяет использовать для наплавки практически любые металлы и сплавы на основе титана, никеля, кобальта, нержавеющих сталей, жаропрочных и тугоплавких на основе вольфрама, молибдена и ниобия, сплавов на основе алюминия, меди и цинка, а также композитных материалов, содержащих карбиды титана, вольфрама, хрома. Важным достоинством этой технологии является возможность использовать одновременно два или более разных материалов, что достигается путем подачи порошков из нескольких сопел (рис. 8.4). Благодаря этому можно наносить покрытия с градиентом свойств по толщине. Так, можно формировать наружную приповерхностную часть покрытия из материала с повышенной прочностью, совмещая, таким образом, восстановление с упрочнением. Типичный пример реализации LENS-технологии показан на рис. 8.5.

Достоинствам LENS-технологии также является возможность восстанавливать тонкостенные элементы деталей. При ее использовании

в зоне лазерной обработки образуется малая зона теплового влияния, благодаря чему оказывается незначительное тепловое воздействие на микроструктуру материала. Детали с наплавкой, осуществляемой с помощью этой технологии, по прочностным свойства превосходят аналогичные детали, полученные литьем либо горячим изостатическим прессованием, а также сопоставимы с кованными деталями.

На рис. 8.6 и 8.7 приведены типичные примеры ремонтных работ, выполненных с использованием LENS-технологии.

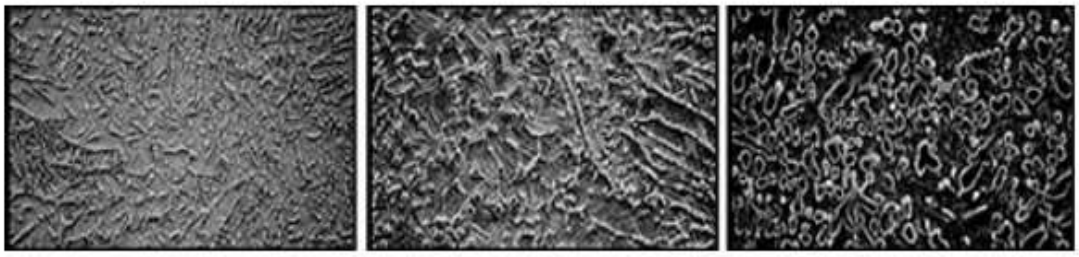
Рисунок 8.4 - Лазерная головка с несколькими соплами

Рисунок 8.5 - Пример реализации LENS-технологии

Рисунок 8.6 - Устранение литейных дефектов в виде пор на поверхности колеса. Основа колеса выполнена из никелевых/титановых сплавов, наплавка – из того же материала

Рис. 8.8 - 8.10 демонстрируют возможности осуществления градиентной наплавки при использовании LENS-технологии. На рис. 8.8 показаны характерные изменения состава и структуры материала на разных участках по толщине наплавляемого покрытия. Градиентная наплавка по прочности превосходит материал основы (рис. 8.9), что делает перспективным ее применение для восстановления изношенных или разрушенных деталей с одновременным упрочнением критически важных зон деталей (рис. 8.10).

Рисунок 8.7 - Ремонт опорного фланца: наплавка изношенных кольцевых элементов из титанового сплава (указаны стрелками)



20% TiC 40% TiC 60% TiC

Рисунок 8.8 - Распределение TiC в Ti-матрице на разных участках по толщине слоя наплавленного покрытия

При реализации LENS-технологии за счет регулирования скорости охлаждения наплавляемого слоя (от 1000 до 5000°С/сек и более) становится возможным формирование заданной микроструктуры наплавки. В частности, быстрое отверждение наплавки позволяет формировать субмикронную микроструктуру, а в случае градиентной наплавки можно получать отдельные участки наплавляемого слоя с требуемой макро-, микро- или нанозернистой структурой. Осуществляемое таким образом регулирование структуры важно, например, при наплавке упрочняющих покрытий на тяжело нагруженные детали зубчатых передач.

Дополнительные возможности LENS-технологии по улучшению свойств восстанавливаемых деталей связаны с формированием наплавляемых слоев из композитных материалов. В частности, в процессе наплавки в состав наносимого основного порошка можно вносить углеродные нанотрубки, фуллерены, карбид бора и другие упрочняющие добавки.

Рисунок 8.9 - Микрошлиф градиентной наплавки и результат испытания образца на разрыв

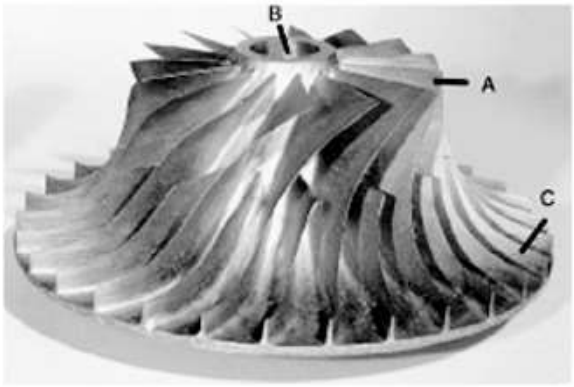


Рисунок 8.10 - Градиентная наплавка колеса из титановых сплавов: Ti-6-4 (участок B) и Ti-22-23 (участки A и C)

Ниже кратко рассмотрен опыт ремонта различных деталей, выполнявшегося с помощью LENS-технологии (рис. 9-11).

На рис. 8.11 показан пример восстановления корпуса подшипника из сплава Ti-6Al-4V Ti-6Al-4V, используемого в газотурбинном двигателе. Поверхность гнезда подшипника была сильно изношена, так что корпус считался непригодным для работы. Для восстановления изношенной области был использован LENS-процесс, после чего была выполнена финишная механическая обработка. Корпус был успешно отремонтирован без каких-либо деформаций (короблений) и прошел пробный прогон в двигателе. Затраты на ремонт составили около 50% от цены новой детали. Срок поставки отремонтированного корпуса составлял несколько дней по сравнению с несколькими неделями в случае поставки нового корпуса.

На рис. 8.12 показан пример весьма тонкого восстановления лабиринтного уплотнения компрессора газовой турбины, изготовленного из сплава Inconel 718. Когда лабиринтное уплотнение оказывается чрезмерно малым в диаметре, оно становится непригодным для работы, поскольку двигатель теряет мощность. Тестовый образец уплотнения был восстановлен наплавкой слоя из сплава Inconel 718 по LENS-технологии. Стоимость восстановленного уплотнения составила около 45% стоимости нового уплотнения. Восстановительная наплавка вызвала небольшое уменьшение внутренних диаметров, которое было обнаружено в процессе проверки. Эти диаметры были подвергнуты механической обработке для достижения требуемых значений в пределах установленных допусков.

Рисунок 8.11- Восстановление корпуса подшипника

Рисунок 8.12 - Восстановление лабиринтного уплотнения компрессора газовой турбины

В верхней части рис. 8.13 показан высокоскоростной приводной вал, восстановленный путем обычного газотермического напыления, где обращает на себя внимание отслаивание в восстановленной конусообразной области вала, а в нижней части – такой же вал, восстановленный с помощью LENS-технологии. Лазерную наплавку проводили с использованием нержавеющей стали 420, которая является более твердой и обладает большей коррозионной стойкостью, чем исходный материал основы или материалы, используемые для восстановления напылением. Затраты на восстановление вала с помощью LENS-технологии составили менее 50% стоимости новой детали.

LENS-технология успешно применялась для восстановления ряда других деталей, в частности, таких как:

- подшипники, уплотнения и соединительные муфты на валах, которые не поддаются восстановлению обычным методами сварки;

- высокоскоростные (до 12 800 об/мин), высокомощные (до 3500 л.с.) и высокоточные валы (с допусками в 0,0005 дюйма);

- крупногабаритный вал из стали 4340 был диаметром 18 дюймов и длиной 16,5 фута с шестерней на одном конце и шлицем на другом конце, для ремонта которого потребовалось около 10 кг наплавочного материала.

На рис. 8.14 показан пример использования LENS-технологии для восстановления деталей авиационного двигателя.

Рисунок 8.13 - Сравнение вала, восстановленного газотермическим напылением (вверху) и LENS-технологией

Рисунок 8.14 - Восстановление деталей авиационного двигателя с помощью LENS-технологии

Для восстановления металлических деталей, наряду с LENS-технологией, широко применяются и другие варианты AM-технологий, основанных на процессах лазерной наплавки. Так, восстановление пуансонов, служащих для производства шатунов автомобильных двигателей, осуществлялось с помощью 3D-принтера компании InssTek (Южная Корея), работающего по технологии DMT (Direct Metal

Tooling). Для печати использовалась инструментальная сталь, которая обеспечивала высокоплотную однородную структуру наплавляемого лазером покрытия. Скорость наращивания слоев доходила до 35 см^3/ч, что делает данный способ ремонта одним из самых быстрых и эффективных. Практика показала, что пуансоны, отремонтированные методом металлической 3D-печати, выходят из строя после выпуска 150 000 шатунов, в то время как пуансоны, производимые по традиционной технологии, оказались в состоянии изготавливать лишь около 45 000 шатунов. При этом общие ремонтные расходы по данной технологии были меньше стоимости обычной технологии изготовления новых пуансонов.

DLMD-технологию перспективно применять для восстановления тонкостенных элементов изделий (рис. 8.15).

Рисунок 8.15 - Восстановление тонкостенной стенки винта шнека с помощью DLMD-технологии

Для восстановления металлических деталей также применяются технологии EBDM (Electron Beam Direct Manufacturing) и IFF (Ion Fusion Formation). Согласно технологии EBDM изношенные поверхности детали восстанавливаются послойным наплавлением материала с помощью электронного луча, а согласно технологии IFF – с помощью потока плазмы, генерируемого плазмотроном. В качестве исходного материала используется прутки из алюминиевых и титановых сплавов, инконеля, конструкционных сталей и др. металлов.

8.3 Ремонт пластмассовых деталей

Совершенствование конструкции машин связано с постоянно расширяющимся применением в качестве конструкционных материалов различных видов пластмасс: полиэтилена, полипропилена, полиамида, поликарбоната и др. В последние годы растет использование пластмасс в конструкциях тракторов, сельскохозяйственных и транспортных машин. В связи с этим приобретают особую актуальность вопросы ремонта деталей из пластмасс. Обычно такие детали восстанавливают, используя методы механического, клеевого или сварного соединения.

Более эффективно ремонтировать детали из пластмасс с использованием АМ-технологий. Так, с помощью 3D-принтеров осуществляется ремонт шестерней различной конструкции, корпусных элементов различного размера и других пластмассовых деталей.

Примеры ремонта различных видов пластмассовых деталей с помощью 3D-принтеров показаны на рис. 8.16 и 8.17. Примеры часто выходящих из строя автомобильных пластиковых деталей, копии которых изготавливаются с помощью АМ-технологий, представлены в табл. 8.1.

Рисунок 8.16 - Восстановленная с помощью 3D-принтера и сломанная деталь из пластика

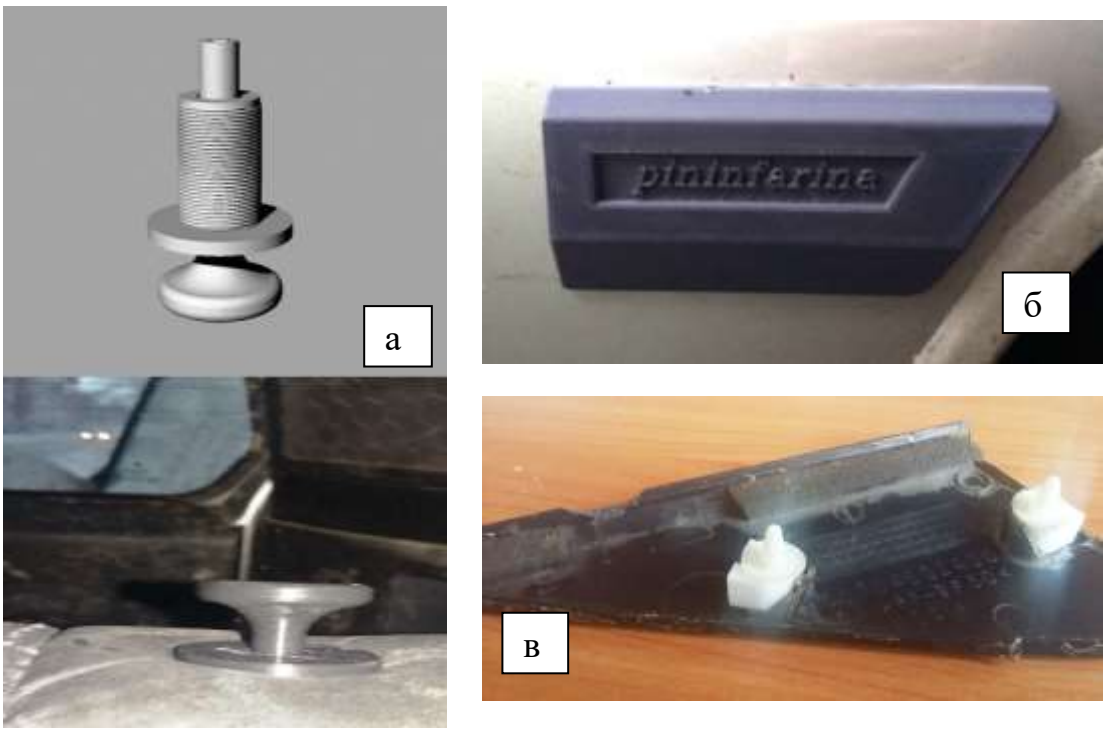
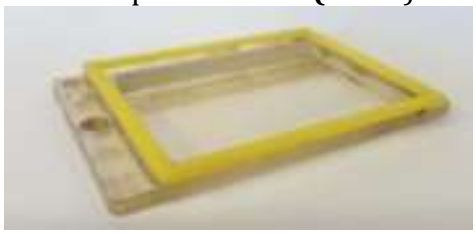


Рисунок 8.17 - Ремонт пластмассовых деталей автомобиля Mitsubishi Pajero Pinin с помощью 3D-принтера а – ручка механизма раскладывания заднего сиденья (пластик PLA PrintProduct); б – молдинг переднего крыла (пластик ABS 3D Lines); в – ремонтные вставки для крышки зеркала (пластик PLA Esun)

Таблица 8.1 - Автомобильные пластиковые детали, изготавливаемые по АМ-технологиям

Крепление резинового уплотнителя двери (Volvo)	Пистоны крепления накладок порогов (Volvo)
Втулка замка крышки бензобака (Volvo)	Уплотнитель плафона подсветки номерного знака (Volvo) 
Рычаг замка багажника (Mitsubishi)	Заглушка буксировочного крюка (SkodaOctavia)

Фиксатор рамки центральной консоли (FiatAlbea)	Шестерня редуктора заднего дворника (Fusion)
Фиксатор трапеции дворников (Ford)	Кнопка рукоятки ручного тормоза (Opel)

Для ремонта пластмассовых деталей в принципе можно применять различные типы 3D-принтеров, осуществляющих печать полимерными материалами. Для устранения некоторых повреждений пластмассовых деталей удобно использовать 3D-ручки, которые представляют собой упрощенный вариант 3D-принтеров.

8.4 Организация ремонтных работ на основе применения аддитивных технологий

АМ-технологии, благодаря своим уникальным возможностям быстро и качественно создавать изделия сложной формы, позволяют существенно повысить эффективность работы ремонтных предприятий по обеспечению запасами деталей.

Традиционно запчасти изготавливаются и поступают в продажу разными по размеру партиями, которые зачастую подлежат длительному хранению. Запчасти привязывают к себе значительную часть финансовых средств, при этом довольно сложно предугадать, когда и сколько запчастей потребуется. Порой некоторые из них никогда не используются. Многие компании производят высоко-кастомизированные продукты, что еще больше увеличивает количество запчастей и, следовательно, усложняет управление запасами. Вполне возможно, что по мере ускорения технического прогресса запчасти,

длительно хранящиеся на складе, уже не будут соответствовать эксплуатационным требованиям на тот момент, когда они понадобятся. Компании также нередко вынуждены проводить ремонт и техобслуживание машин и оборудования, которые уже настолько устарели, что запчасти для них больше не существуют, а изготовление таких запчастей является дорогостоящим и длительным, особенно если для их изготовления требуются специальные инструменты, пресс-формы, литейные формы и т.п.

Кардинальным решением указанных проблем является переход к концепции цифровых запчастей, т.е. к новой форме организации ремонта и техобслуживания, предполагающей хранение всех данных о запчастях в цифровом виде. Согласно этой концепции запчасти изготавливаются в соответствии с реальными потребностями с помощью 3D-принтеров, которые обычно расположены географически близко к конечному пользователю. Сегодня к категории цифровых запчастей, изготовление которых с помощью 3D-печати является не только технологически возможным, но и экономически целесообразным, относятся 5-10% используемых запчастей.

Благодаря использованию цифровых запчастей повышается эффективность ремонта и техобслуживания: улучшается доступность запчастей, сокращаются сроки их доставки, а изготовление отдельных деталей или небольших партий деталей станет экономически выгодным. Помимо затрат на производство, важно также учитывать затраты от простоя, которые могут стать настолько значительными, что цена самой запчасти будет по сравнению с ними мала.

При необходимости цифровые запчасти могут быть изготовлены очень быстро, поскольку никаких специальных инструментов для их изготовления не требуется, а вся информация о запчастях доступна в цифровом формате. Цифровые запчасти не занимают полки в складском помещении. Они могут быть изготовлены распределенным образом, что сокращает сроки доставки и пути транспортировки. Использование цифровых запчастей также может снизить затраты, связанные с таможенным оформлением. Цифровое производство позволяет кастомизировать детали по мере необходимости, делая возможным создание по желанию потребителя разнообразных вариантов деталей, с новыми конструктивными и функциональными особенностями. Цифровые запчасти также могут быть перепроектированы для оптимизации 3D-печати, поскольку каждой технологии 3D-печати соответствуют свои конструкции изготавливаемых деталей, оптимальные как по свойствам, так и по стоимости.

Существенным барьером на пути расширения производства запчастей с помощью 3D-печати является отсутствие цифровых 3D-моделей деталей, создание которых требует соответствующих ресурсов. Переход на цифровые запчасти способствует снятию этого барьера,

увеличению скорости печати, более широкому выбору печатных материалов и более низкими ценами на их печатание. Более полная доступность печатных материалов и деталей может быть достигнута с помощью цифровой сети запчастей. К числу барьеров, сдерживающих производство запчастей с помощью 3D-печати, также относятся недостаточные функциональные возможности современных 3D-принтеров, в частности, ограничения в размерах создаваемых деталей, материалах для их изготовления, размерной точности изготовления, качестве поверхности.

Итак, применение АМ-технологий на ремонтных предприятиях позволяет значительно сократить расходы на покупку запчастей, исключить вероятность сверхнормативного простоя машин в ремонте из-за нехватки запчастей и ускорить выпуск машин с неплановых ремонтов, упростить инфраструктуру материально-технического обеспечения. Ремонтные предприятия, используя аддитивные технологии, могут создавать собственные склады запчастей или пользоваться услугами специализированных фирм, изготавливающих детали на основе аддитивных технологий. При этом для получения требуемой детали достаточно переслать ее 3D-модель в одну из таких фирм. В результате упрощается логистика и сокращается время поставки запчастей, ускоряется ремонт и уменьшаются объемы складских запасов. В итоге применение аддитивных технологий в ремонтном производстве может привести к коренному изменению принципов организации всей работы ремонтных предприятий.

Контрольные вопросы

1. Какую роль играют аддитивные технологии в ремонте машин?
2. Какие виды аддитивных технологий применяют при восстановлении изношенных металлических деталей путем наплавки?
3. Какие виды аддитивных технологий применяют для устранения литейных дефектов металлических деталей в виде локальных повреждений, пор и т.п.?
4. Приведите примеры эффективного применения LENS-технологии при восстановлении металлических деталей.
5. Какой вид аддитивных технологий перспективно применять для восстановления тонкостенных элементов изделий?
6. Почему эффективно ремонтировать детали из пластмасс с использованием аддитивных технологий?
7. Приведите примеры применения аддитивные технологии при ремонте пластмассовых деталей.
8. Чем обусловлена целесообразность проведения ремонтных работ на основе применения аддитивных технологий?
9. Какие основные изменения происходят в организации ремонтных работ в случае использования запчастей, изготавливаемых путем 3D-печати?

10. Назовите барьеры, сдерживающие производство запчастей с помощью 3D-печати.

9. КАЧЕСТВО ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

9.1 Точность изготовления

Точность изготовления деталей с помощью АМ-технологии (точность 3D-печати) определяется степенью соответствия размеров изготовленной детали и ее компьютерной модели. К факторам, характеризующим точность 3D-печати, относятся точность позиционирования и разрешающая способность.

Точность позиционирования – это величина, показывающая, насколько точно можно задать перемещение в системе координат 3D-принтера.

В 3D-принтерах, имеющих классическую кинематическую схему, горизонтальная платформа постепенно (по мере наращивания слоев изготавливаемой детали) опускается по вертикальной оси Z, в то время как устройство, с помощью которого непосредственно осуществляется печать, двигается в плоскости платформы по осям X-Y. При этом точность позиционирования 3D-принтера определяется точностью позиционирования данного устройства. В 3D-принтерах разных типов таким устройством может быть, например, экструдер (FDM), струйная головка (3DP), лазерная головка (SLA, SLM) и т.д. Соответственно, точность позиционирования можно рассматривать как параметр, который в процессе печати характеризует максимально возможное отклонение от заданной траектории центра сопла экструдера или струйная головка, центра лазерного пятна и т.д. Точность позиционирования зависит от конструктивных особенностей системы перемещения 3D-принтера и обычно составляет менее 30-50 мкм. Этот параметр указывается для каждой конкретной модели 3D-принтера с учетом рекомендованной скорости перемещения.

Разрешающая способность – это минимальные достижимые размеры структурных элементов изготавливаемой детали, которые определяются шириной и толщиной слоев строительного материала, печатаемых в один проход. Разрешение 3D-печати зависит от технических характеристик 3D-принтера, а также от особенностей реализации процесса печати и для разных видов АМ-технологий может принимать различные значения.

В FDM-технологии ширина и толщина осаждаемых слоев термопластика зависит от диаметра сопла экструдера и может варьироваться в пределах 0,2- 2 мм. Кроме того, следует учитывать возможные изменения этих параметров в связи с растеканием (сплющиванием) осажденных слоев с учетом их вязкости (текучести).

В SLA-технологии ширина затвердевшего слоя фотополимера определяется диаметром лазерного пятна и составляет 50-300 мкм, а его толщина зависит от вязкости (текучести) фотополимера в жидком состоянии и может доходить до 25 мкм.

В SLS/SLM-технологии ширина спеченного/сплавленного слоя порошка (лазерной дорожки) определяется диаметром лазерного пятна и составляет 20-70 мкм, а его толщина зависит от размеров частиц порошка, его сыпучести, способности образовывать комки и составляет 50-300 мкм.

В некоторых видах АМ-технологий возможны искажения формы создаваемой детали из-за усадки строительного материала, которая происходит в ходе превращений материала под влиянием внешних воздействий.

Характерным тому примером является усадка фотополимерной смолы в процессе затвердевания при УФ облучении в SLA-технологии. Обычно степень отверждения фотополимера к концу процесса построения детали достигает 50-80%. Затем деталь подвергают постобработке, которая заключается в ее дополнительном облучении в УФ-камере, в результате чего степень отверждения увеличивается до 90%. В целом усадка фотополимера при затвердевании может достигать нескольких процентов от объема.

Аналогичным образом подвергаются усадке полимерные волокна при охлаждении в FDM-технологии, глинистые композиции в результате высыхания в MJS-технологии, порошки в результате спекания или плавления в SLS/SLM-технологии.

9.2 Качество поверхности

Поверхности деталей, изготавливаемых с помощью АМ-технологий, как правило, имеют рельефный вид в силу присущего этим технологиям послойного характера построения изделий. Обычно на поверхности боковых стенок деталей, создаваемых путем 3D-печати, может формироваться два типа рельефа: волнистый рельеф, если стенка расположена перпендикулярно строительной платформе (т.е. параллельно направлению построения), и ступенчатый рельеф, если стенка расположена под наклоном или является криволинейной. Наличие рельефа поверхности обычно рассматривается как весьма нежелательное явление с учетом требований, предъявляемых к качеству поверхности деталей. Схема формирования и внешний вид рельефа обоих типов показаны на рис. 9.1-9.3.

Можно сказать, что волнистый рельеф трансформируется в ступенчатый при отклонении боковой стенки от положения, перпендикулярного строительной платформе. Чем больше будет это отклонение, тем более ярко выраженным будет ступенчатый рельеф.

Углы наклона поверхностей создаваемых деталей задаются формой деталей. Поэтому для снижения ступенчатого рельефа желательно выбирать для построения такие по форме детали, у которых углы наклона поверхностей или их отдельных участков близки к 90°, а в лучшем случае равны 90°. Однако возможности такого выбора весьма ограничены.

Наиболее распространенный путь снижения и волнистого, и ступенчатого рельефа поверхности – уменьшение толщины осаждаемых слоев строительного материала.

Сглаживание рельефа поверхности с уменьшением толщины осаждаемых слоев показано на рис. 9.4-9.6.

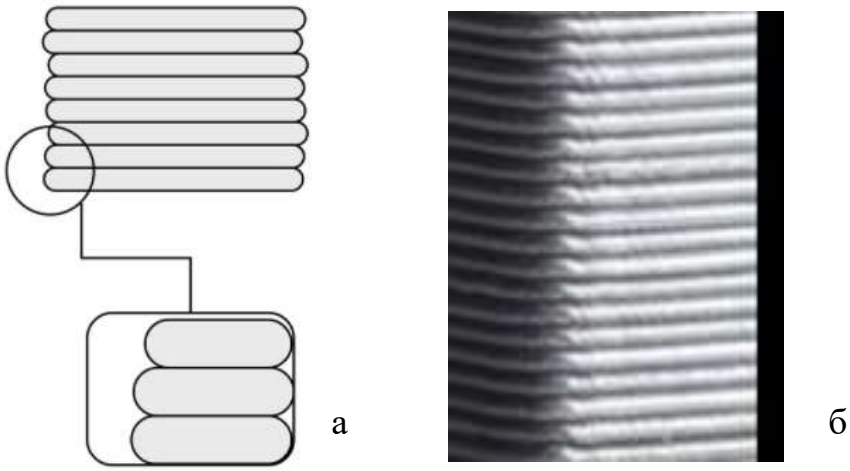


Рисунок 9.1 - Схема формирования (а) и внешний вид (б) волнистого рельефа на боковой стенке, расположенной перпендикулярно строительной платформе (FDM-технология)

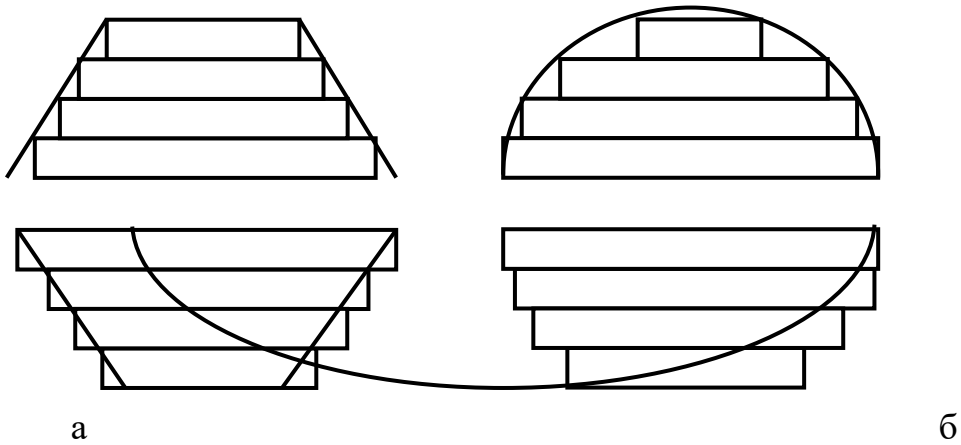


Рисунок 9.2 - Схемы формирования ступенчатого рельефа поверхностей наклонных (а) и криволинейных (б) стенок

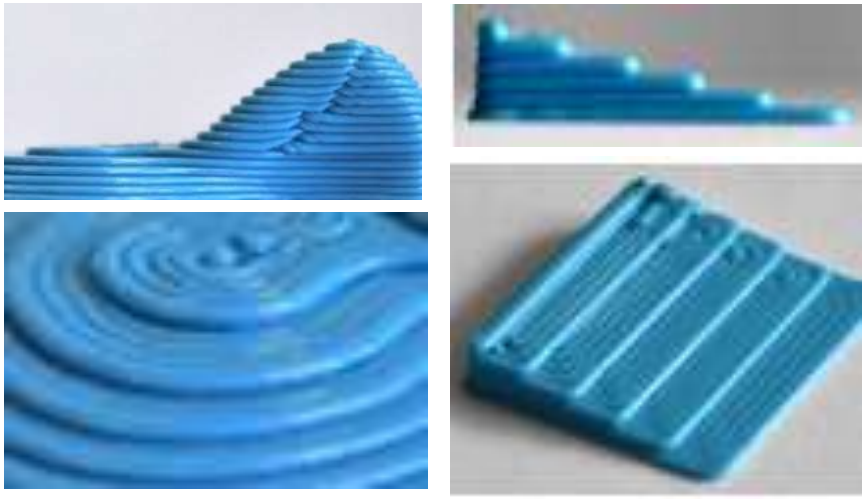


Рисунок 9.3 - Внешний вид ступенчатого рельефа (FDM-технология)

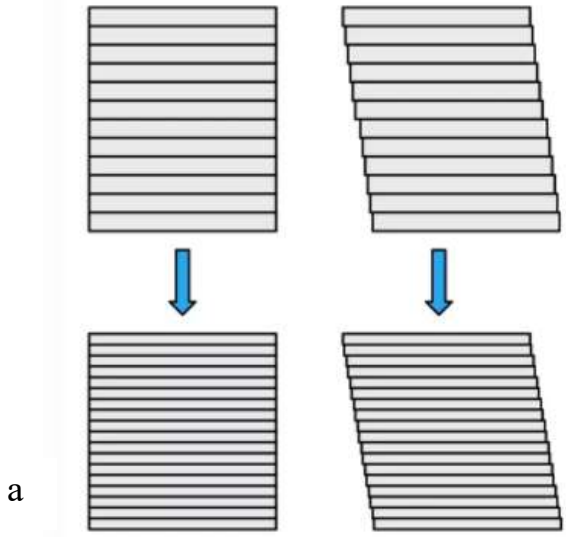


Рисунок 9.4 - Сглаживание волнистого (а) и ступенчатого (б) рельефа поверхности с уменьшением толщины осаждаемых слоев

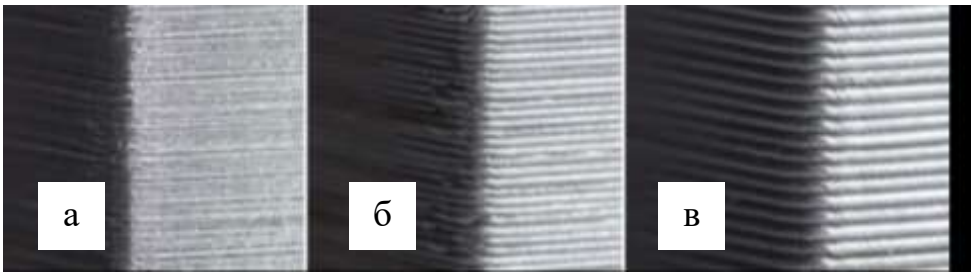
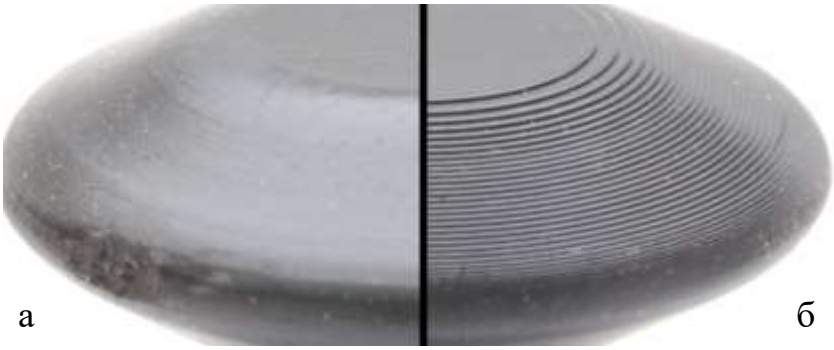


Рисунок 9.5 - Сглаживание волнистого рельефа поверхности с уменьшением толщины осаждаемых слоев h (FDM-технология)
h(а) <h(б) < h(в)



а б

Рисунок 9.6 - Сглаживание ступенчатого рельефа поверхности с уменьшением толщины осаждаемых слоев *h* (SLA-технология) *h* =10 мкм(а) и 100 мкм (б)

АМ-технологии позволяют наращивать довольно тонкие слои. Однако в силу особенностей процессов наращивания толщину слоев можно уменьшать до определенных пределов, что накладывает соответствующие ограничения на возможности снижения ступенчатого рельефа (табл. 9.1). Кроме того, с уменьшением толщины слоев растет продолжительность и себестоимость изготовления деталей.

Таблица 9.1 - Типичные пределы изменения толщины (*h*) наращиваемых слоев для разных видов АМ-технологий

Виды технологий	SLA	SLS	SLM	3DP	MJM	FDM	LOM
h_{min}, мм	0,016	0,02	0,02	0,076	0,016	0,1	0,1
h_{max}, мм	0,25	0,25	0,2	0,254	0,032	0,5	3,0

В рассмотренном выше варианте снижения ступенчатого рельефа за счет уменьшения толщины слоев предполагалось, что все слои имеют одинаковую толщину, т.е. CAD-модель равномерно расслаивается вдоль направления построения. Такой вариант сравнительно прост в реализации, однако в тех случаях, когда изделия имеют криволинейные поверхности, равномерное расслаивание оказывается недостаточно эффективным и вместо него предпочтение отдается адаптивному расслаиванию. Суть адаптивного расслаивания состоит в том, что толщину слоев изменяют вдоль направления построения по заданной программе: уменьшают, если угол наклона наращиваемых частей поверхности изделия мал, и, наоборот, увеличивают до довольно больших значений, если угол наклона равен 90°или близок к 90°. Благодаря этому удается не только обеспечить снижение ступенчатого рельефа поверхности на всем ее протяжении вдоль направления построения, но также сократить число необходимых слоев и тем самым снизить продолжительность исебестоимостьпостроения.

Различные варианты адаптивного расслаивания, обеспечивающего снижение ступенчатого рельефа поверхности при аддитивном построении изделий, показаны на рис. 9.7 и 9.8.

Однако возможности адаптивного расслаивания ограничиваются узким диапазоном изменения толщины слоев, характерным для аддитивных технологий, о чем упоминалось выше (табл. 9.1). Кроме того, для изменения толщины слоев по мере их наращивания требуется соответствующее изменение параметров процесса формирования слоев, что ведет к усложнению этого процесса. Исключением является SL-технология, которая при ее реализации по схеме «раскрой-пакетирование-соединение» позволяет легко варьировать толщину пакетируемых листовых выкроек (от 0,1 мм до нескольких миллиметров) путем раскроя листов исходного материала разной толщины.

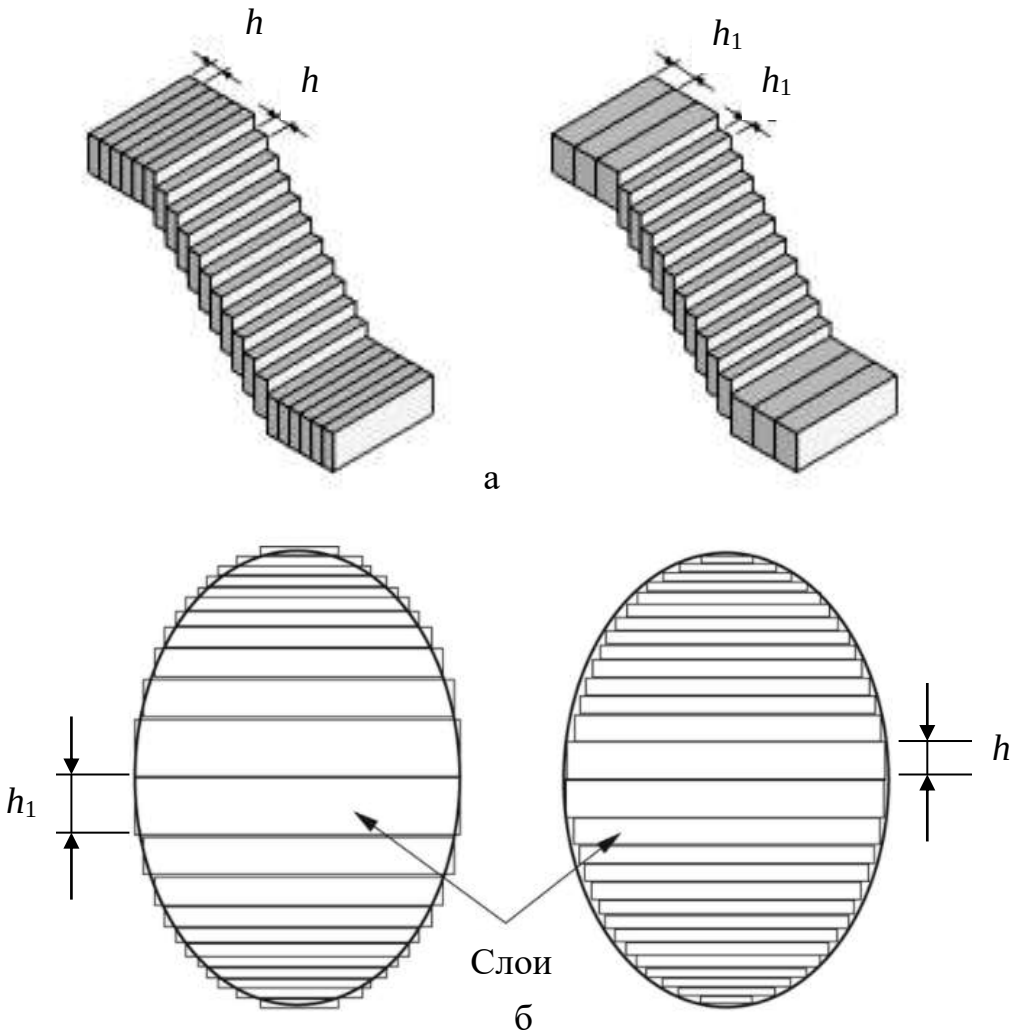


Рисунок 9.7 - Схемы адаптивного расслаивания, обеспечивающего снижение ступенчатого рельефа поверхности наклонной (а) и криволинейной (б) стенки изделия при аддитивном построении

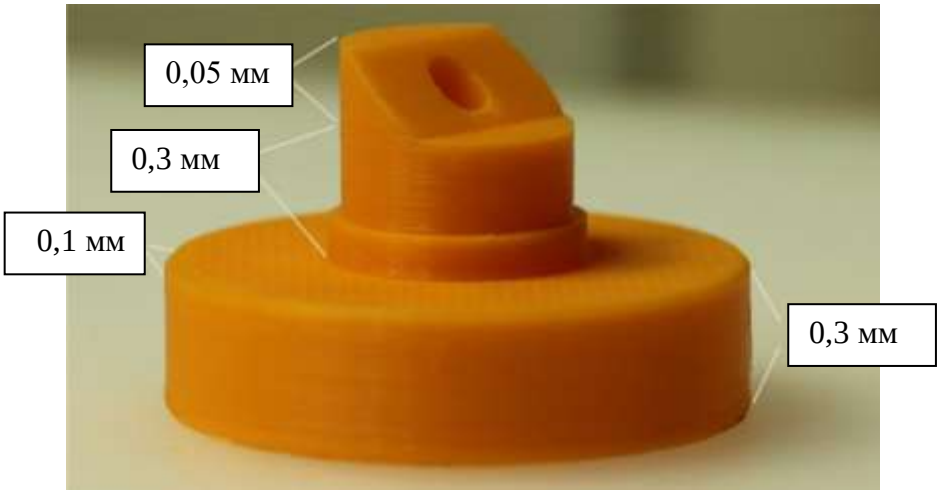


Рисунок 9.8 - Адаптивное расслаивание детали при аддитивном построении (FDM-технология)

Величина ступенчатого рельефа зависит не только от толщины слоев, но и от их ориентации. Поэтому, выбирая оптимальное направление расслаивания CAD-моделей, можно обеспечить существенное снижение ступенчатого рельефа. При этом следует учитывать, что ориентация слоев также способна влиять на число необходимых для построения слоев, объем подпирающего материала, механическую прочность создаваемых деталей.

Такое многофакторное влияние ориентации слоев на процесс построения может приводить к ситуациям, когда та или иная ориентация слоев, выбранная с целью снижения ступенчатого рельефа, будет оказывать отрицательное, порой недопустимое влияние на другие параметры этого процесса. Примером тому являются представленные на рис. 9.9 варианты ориентации слоев при построении по SL-технологии деталей из металлических листовых выкроек, соединенных адгезивом.

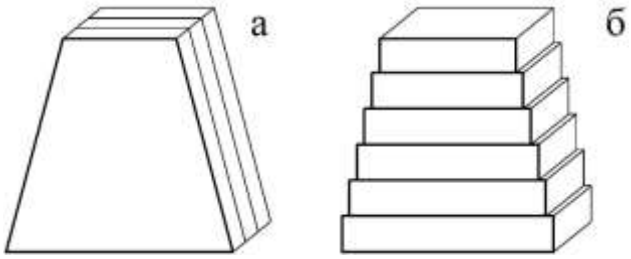


Рисунок 9.9 - Два варианта SL-построения изделия с вертикальной (а) и горизонтальной (б) ориентацией слоев]

При вертикальной ориентации слоев практически полностью исключается формирование ступенчатого рельефа, однако создаваемая

при этом деталь не в состоянии выдерживать значительные сжимающие и сдвиговые нагрузки в вертикальном направлении, поскольку они могут привести к ее расслаиванию из-за разрушения прослоек адгезива. Во избежание этого следует использовать горизонтальную ориентацию слоев, однако в этом случае боковые поверхности создаваемой детали будут иметь ярко выраженный ступенчатый рельеф.

Обычно при выборе ориентации расслаивания предполагается, что деталь строится из параллельных слоев. Если деталь имеет сложную форму с выступами или изгибами, то для снижения ступенчатого рельефа на соответствующих участках детали ориентация расслаивания изменяется. В простейшем случае направление ряда параллельных слоев изменяется на 90°. Более эффективным способом снижения ступенчатого рельефа является постепенный поворот слоев в своем расположении с учетом особенностей формы создаваемой детали – так называемое многоосевое расслаивание. В результате такого расслаивании образуется ряд слоев неоднородной толщины, благодаря чему обеспечивается наибольшее соответствие поверхностей построенной детали и ее CAD-модели. Однако обеспечить контролируемое изменение толщины слоя на его различных участках довольно трудно, а порой и невозможно (с учетом особенностей построения, присущих разным видам аддитивных технологий). Например, в SLS-технологии слой переменной толщины формируется путем соответствующего управления параметрами лазерной обработки.

Снижение ступенчатого рельефа уменьшением толщины слоев, а также рациональным ориентированием слоев нередко оказывается недостаточным. Поэтому поверхности построенных деталей, как правило, подвергают дополнительной обработке (постобработке), в результате которой может быть достигнуто практически полное удаление ступенчатого рельефа. Пост-обработка осуществляется разными способами: фрезерованием (на станках с ЧПУ), шлифованием, полированием, дробеструйной и пескоструйной обработкой, лазерным оплавлением и т.д.

Формирование особого вида рельефа поверхности боковых стенок деталей, изготавливаемых с помощью АМ-технологий, связано с построчным характером осаждения полосок (штриховок) строительного материала. Концы этих полосок, выходящие на поверхность детали, обычно имеют округлую форму, вследствие чего поверхность боковых стенок приобретает характерный бугристый рельеф, как показано на рис. 9.10.

Радикальным способом предотвращения такого рельефа является осаждение первичной полоски по контуру, окаймляющему очередной наносимый слой. Затем в пределах этого контура построчно осаждаются остальные полоски (штриховки) до полного формирования слоя заданной конфигурации (рис. 9.11). Кроме того, такой рельеф можно

сгладить за счет уменьшения поперечных размеров построчно наносимых полосок строительного материала, а также за счет увеличения зон перекрытия смежных полосок (рис. 9.12).

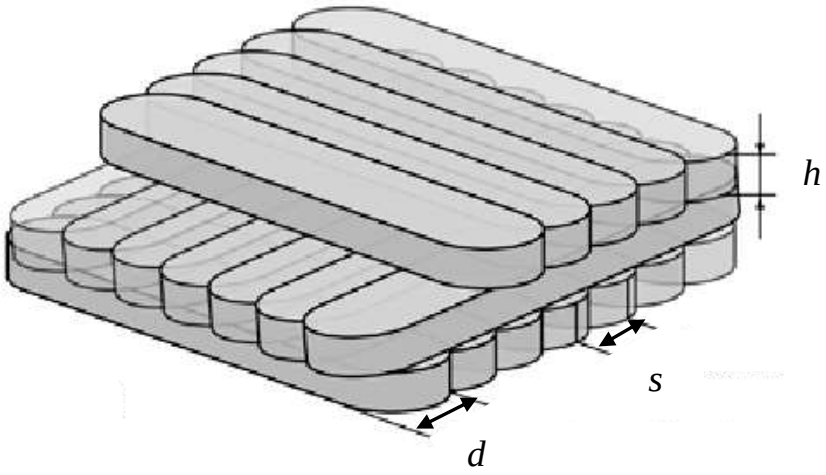


Рисунок 9.10 - Формирование рельефа поверхности боковых стенок деталей при SLS-построении путем построчного спекания полосок
строительного порошкового материала *h* – толщина слоя порошка, *s* – расстояние между серединами смежных полосок, *d* – диаметр лазерного пятна (ширина полоски)

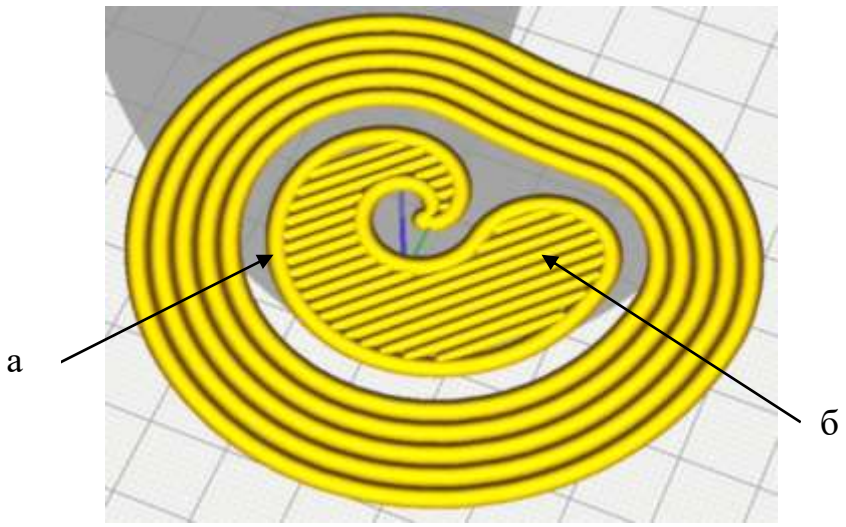


Рисунок 9.11 - Контурное 9 (а) и построчное (б) формирование полосок строительного материала при аддитивном построении

При изготовлении деталей с помощью АМ-технологий поверхностный рельеф может формироваться не только на боковых стенках, но и в плоскости осаждаемых слоев, как это показано на рис. 9.12.

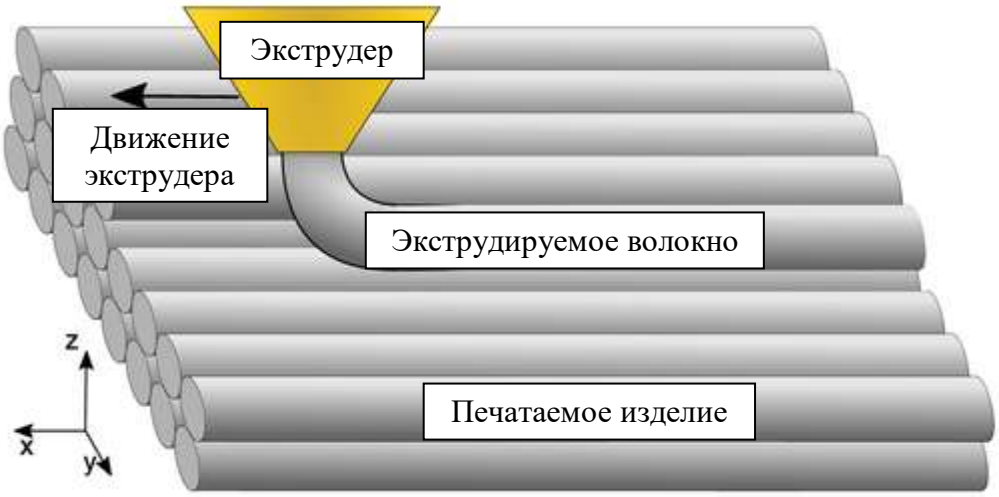


Рисунок 9.12 - Формирование волнистого рельефа в плоскости осаждаемых слоев при FDM-построении

Для некоторых видов АМ-технологий характерно образование шероховатой поверхности изготавливаемых деталей. Типичный тому пример –поверхность деталей, получаемых по SLS-технологии (рис. 9.13). У таких деталей шероховатость поверхности тем больше, чем больше размеры частиц спекаемых порошков.

Рисунок 9.13 - Шероховатая поверхность детали, изготовленной по SLS-технологии

9.3 Механическая прочность

Прочностные свойства любых деталей независимо от технологии их изготовления в значительной мере определяются толщиной их составных частей, а также свойствами материала, из которого они изготовлены. Однако для деталей, получаемых с помощью АМ-технологий, могут иметь место и другие факторы, влияющие на их прочность. Эти факторы связаны с особенностями послойного

построения деталей и могут проявляться по-разному в разных видах АМ-технологий.

Рассмотрим для примера, как могут влиять на прочность деталей некоторые условия их изготовления по FDM-технологии.

1. Направление укладки волокон

При построчном формировании слоев, когда в пределах каждого слоя полимерные волокна укладываются параллельно друг другу в сплошной ряд, важно располагать волокна так, чтобы они были ориентированы определенным образом относительно направления приложения нагрузки, действующей на деталь при ее эксплуатации. Дело в том, что детали, напечатанные на FDM-3D-принтерах, обладают анизотропией свойств, т.е. имеют различные механические свойства в разных направлениях. В частности, наибольшая прочность имеет место в направлении вдоль укладываемых волокон и, соответственно, наименьшая – в поперечном направлении, т.е. труднее разорвать сами волокна, чем оторвать их друг от друга в местах соединения (рис. 9.14). Поэтому предпочтительнее ориентировать деталь при ее построении на платформе FDM-3D-принтера таким образом, чтобы направление наименьших нагрузок совпадало с направлением печати.

Традиционно при построении деталей по FDM-технологии волокна укладываются построчно двумя способами, когда они оказываются параллельными во всех слоях или взаимно-перпендикулярными в смежных слоях (рис. 9.15). В первом случае угол между направлением расположения волокон в смежных слоях $\alpha = 0^o$, во втором случае – $\alpha = 90^o$. Однако, как показывает практика, прочностные свойства деталей могут быть улучшены, если угол α принимает некоторые промежуточные значения $0^o < \alpha < 90^o$.

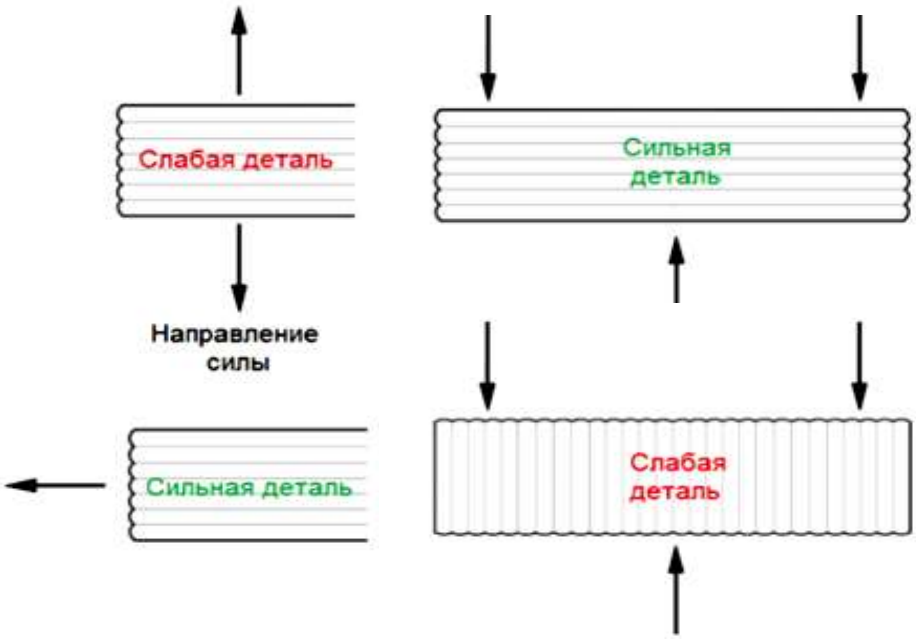


Рисунок 9.14 - Связь между прочностью и соотношением

направлений расположения волокон и направлений нагрузок для детали, полученной по FDM-технологии

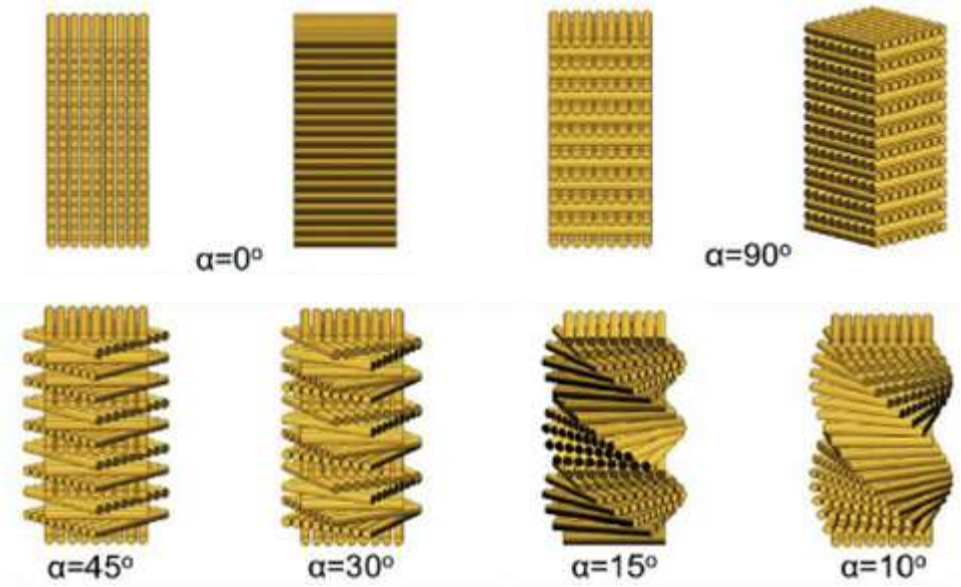


Рисунок 9.15 - Различные варианты взаимной ориентации волокон в смежных слоях при построении деталей по FDM-технологии

Структура получаемых таким способом деталей подобна структуре клешней американского омара (рис. 9.16). Возможность создавать изделия с такой структурой является демонстрацией преимуществ АМ-технологий, позволяющих широко использовать принципы биопроектирования.

Рисунок 9.16 - FDM-построение изделия со структурой, подобной структуре клешней омара

2. Узор и полнота заполнения

Прочность детали можно увеличить путем изменения узора и полноты заполнения ее объема полимерными волокнами при FDM-построении.

Существуют различные варианты узоров заполнения, основными считаются следующие: прямоугольное, треугольное и шестиугольное заполнение «сотами» (рис. 9.17). Считается, что треугольное заполнение обеспечивает наибольшую прочность деталей в силу хорошо известной в механике жесткости треугольника.

а б в

Рисунок 9.17 - Варианты узоров заполнения объема детали полимерными волокнами при FDM-3D-печати: прямоугольное (а), треугольное (б) и шестиугольное (сотовое) (в) заполнение

Полнота заполнения также бывает различной: от 0% (полая деталь) до 100% (сплошная деталь) (рис. 9.18). Испытания показывают, что деталь с 50%-заполнением обычно на 25% прочнее, по сравнению с деталью с 25%-заполнением, в то время как при увеличении заполнения детали от 50% до 75% прочность ее возрастает приблизительно на 10%. Вместе с тем 100%-заполнение детали повышает прочность на изгиб приблизительно в 6 раз по сравнению с деталью, имеющей 20% заполнение.

3. Дефекты построения

При FDM-построении деталей в них могут возникать различные дефекты, приводящие к снижению прочности. Наиболее типичным дефектом является рельеф поверхности боковых стенок, характеризующийся наличием выступом и впадин, являющихся концентраторами напряжений и, как следствие, потенциальными очагами разрушения (рис. 9.19).

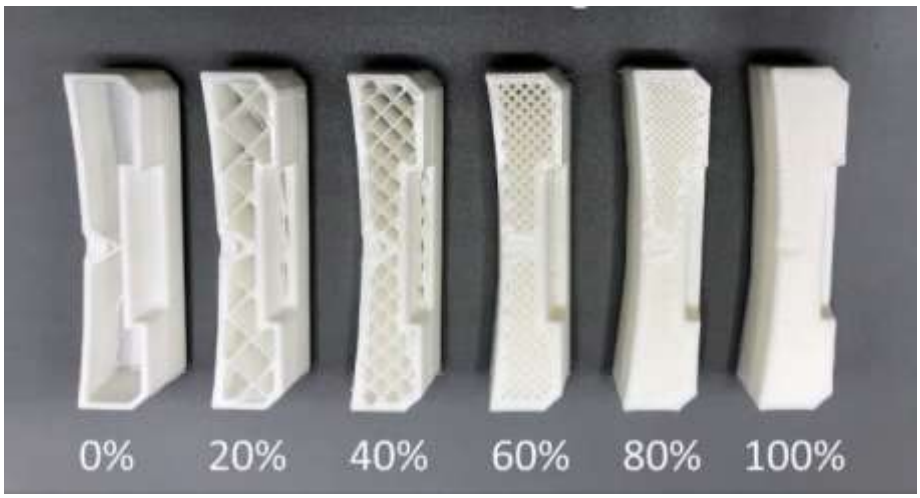


Рисунок 9.18 - Различная полнота заполнения деталей при FDM-построении

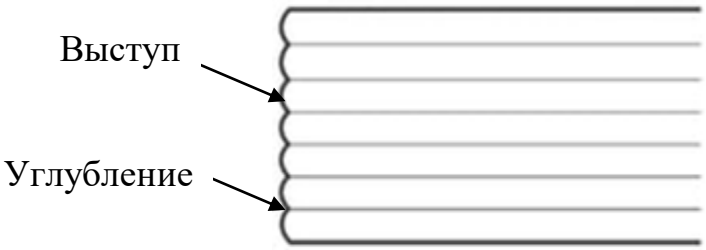


Рисунок 9.19 - Концентраторы напряжений в виде выступов и углублений на поверхности боковой стенки детали, полученной по FDM-технологии

На рис. 9.20 демонстрируются различнные подходы к решению проблемы локального упрочнения детали при ее изготовлении по FDM-технологии. Упрочнению подлежал участок в центральной, сравнительно тонкой части детали, подвергающийся наибольшим нагрузкам при эксплуатации.

Локальное упрочнение этого участка достигалось следующими способами: повышением полноты заполнения участка (рис. 9.20, а); созданием утолщенной стенки по периметру участка (рис. 9.20, б); формированием продольного отверстия в середине участка, в которое помещается и запечатывается прочный стержень (рис. 9.20, в).

Сравнительно высокой прочностью обладают металлические детали, изготавливаемые по SLM-, EBM- и DLMD-технологиям, когда в процессе построения металлический порошок полностью переплавляется под действием лазерного или электронного луча, в результате чего формируется сплошная монолитная структура. Особенность построения изделий в рамках этих технологий состоит в

том, что последовательно формируемые слои металлического порошка периодически подвергаются нагреванию и охлаждению.

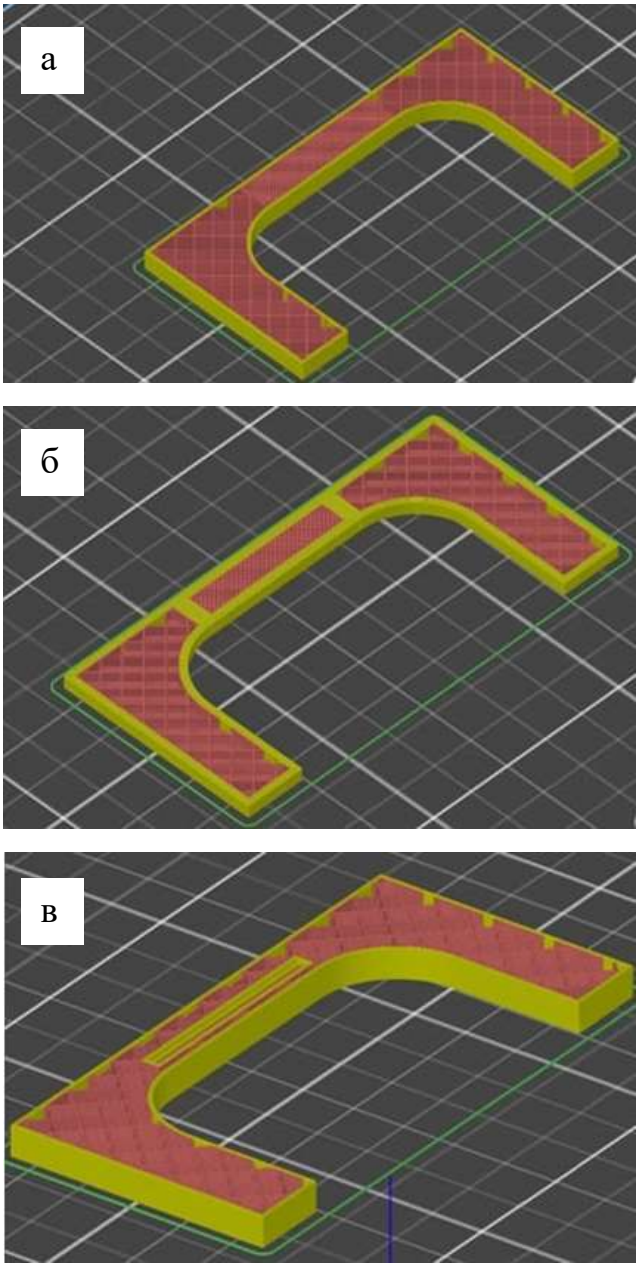


Рисунок 9.20 - Локальное упрочнение детали при изготовлении по FDM-технологии (пояснения в тексте)

После нанесения данного слоя порошка осуществляется его нагревание, приводящее к сплавлению порошка в пределах данного слоя, а также к сплавлению данного слоя с предыдущим слоем. К моменту нанесения следующего слоя данный слой охлаждается. Такие циклические изменения температуры могут вызывать деформирование создаваемой детали. Кроме того, в результате циклических изменений температуры и неравномерного распределения порошка в наносимом слое могут возникать структурные дефекты детали в виде микротрещин.

Для предотвращения этих нежелательных явлений следует оптимизировать параметры процесса построения детали, обеспечивать их точное соблюдение.

Для повышения прочности деталей, изготовленных с использованием АМ-технологиям, проводится их упрочняющая постобработка. Так, на пластиковые детали, полученные по FDM- или SLA-технологиям, наносят упрочняющие покрытия, а пористую структуру металлических деталей, полученных по SLS-технологии, пропитывают расплавами легкоплавких металлов.

Значительные перспективы упрочнения изделий, изготавливаемых с использованием АМ-технологий, связаны с уникальными возможностями этих технологий создавать сложные по форме монолитные детали, каждая из которых объединяет в себе несколько более простых деталей, традиционно изготавливаемых в отдельности и затем собираемых в узел путем механических креплений, пайки, склеивания и т.д.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется точность изготовления деталей с помощью аддитивных технологий (точность 3D-печати)?
2. Назовите факторы, характеризующие точность 3D-печати.
3. Что такое точность позиционирования 3D-принтера?
4. От каких факторов зависит точность позиционирования 3D-принтера?
5. Что такое разрешающая способность 3D-принтера?
6. От каких факторов зависит разрешающая способность 3D-принтера?
7. Объясните причины волнистого и ступенчатого рельефа поверхности изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий.
8. Назовите возможные пути снижения ступенчатого рельефа поверхности изделий, получаемых с помощью аддитивных технологий.
9. Поясните, как прочность изделия может зависеть от условий изготовления на примере реализации FDM-технологии.
10. Приведите примеры повышения прочности изделий, изготовленных с помощью аддитивных технологий, за счет проведения упрочняющей постобработки.

10. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И СЕБЕСТОИМОСТЬ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

10.1 Производительность аддитивных технологических процессов

Производительность технологического процесса изготовления деталей – это характеристика технологического процесса, означающая его способность обеспечивать изготовление определенного количества деталей в течение заданного промежутка времени.

Производительность технологических процессов в общем случае определяется условиями их осуществления и зависит от технических характеристик используемого технологического оборудования. Соответственно, производительность аддитивных технологических процессов определяется условиями послойного построения изделий и зависит от технических характеристик используемых 3D-принтеров.

Производительность аддитивных технологических процессов принято оценивать, прежде всего, по скорости 3D-печати, т.е. по скорости послойного построения изделия, хотя в общем случае, кроме собственно операции печати, следует учитывать и другие, порой, весьма длительные операции, непосредственно связанные с печатью, например, 3D-моделирование и слайсинг, а также постобработку.

Скорость 3D-печати определяется либо как расстояние, проходимое за единицу времени в направлении послойного построения изделия, т.е. по вертикали (линейная скорость печати), либо как объем изделия, печатаемый за единицу времени (объемная скорость печати). В первом случае предполагается, что скорость печати по вертикали является постоянной, не зависящей от формы изделия, т.е. когда площадь горизонтального сечения изделия не изменяется по высоте изделия (рис. 10.1, а). Наоборот, при использовании второго способа предполагается, что скорость печати по вертикали не является постоянной, а зависит от формы изделия, т.е. когда площадь горизонтального сечения изделия изменяется по высоте изделия (рис. 10.1, б).

Рассмотрим факторы, влияющие на скорость 3D-печати, на примере изготовления деталей с помощью FDM-технологии, согласно которой печать осуществляется следующим образом: полимерные волокна в расплавленном (размягченном) состоянии выдавливаются из сопла экструдера, который движется в горизонтальной плоскости и пошагово перемещается вверх, благодаря чему волокна послойно наращиваются на платформу, где происходит построение детали. С учетом особенностей реализации FDM-технологии к основным факторам, влияющим на скорость печати, относятся: 1) диаметр

волокна, определяемый диаметром сопла экструдера; 2) плотность заполнения объема печатаемой детали; 3) скорость выдавливания волокна из сопла и соответствующая ей скорость перемещения экструдера в горизонтальной плоскости.

Рисунок 10.1 - Изделия с постоянным (а) и переменным (б) сечением в направлении послойного построения (FDM-технология)

Скорость печати тем больше, чем больше диаметр волокон, т.е. чем больше толщина наращиваемых слоев, поскольку при этом требуется меньшее количество слоев для построения детали (рис. 10.2). Но с другой стороны, осаждаемые волокна по мере увеличения диаметра становятся все более склонными к сплющиванию (растеканию), чему способствует снижение вязкости термопластичного материала волокон в результате нагрева в экструдере. Такое деформирование волокон является нежелательным, поскольку делает построение деталей менее точным. Кроме того, с увеличением толщины слоев становится более ярко выраженным рельеф поверхности боковых стенок печатаемой детали.

Рисунок 10.2 - Изделия с разной толщиной наращиваемых слоев: 0,3 мм (а), 0,2 мм (б) и 0,1 мм (в) (FDM-технология)

Скорость печати тем больше, чем меньше плотность заполнения объема печатаемой детали, поскольку при этом требуется меньшее количество проходов экструдера в горизонтальной плоскости,

необходимых для формирования очередного слоя детали (рис. 10.3). Но вместе с тем, с уменьшением плотности заполнения уменьшается прочность детали.

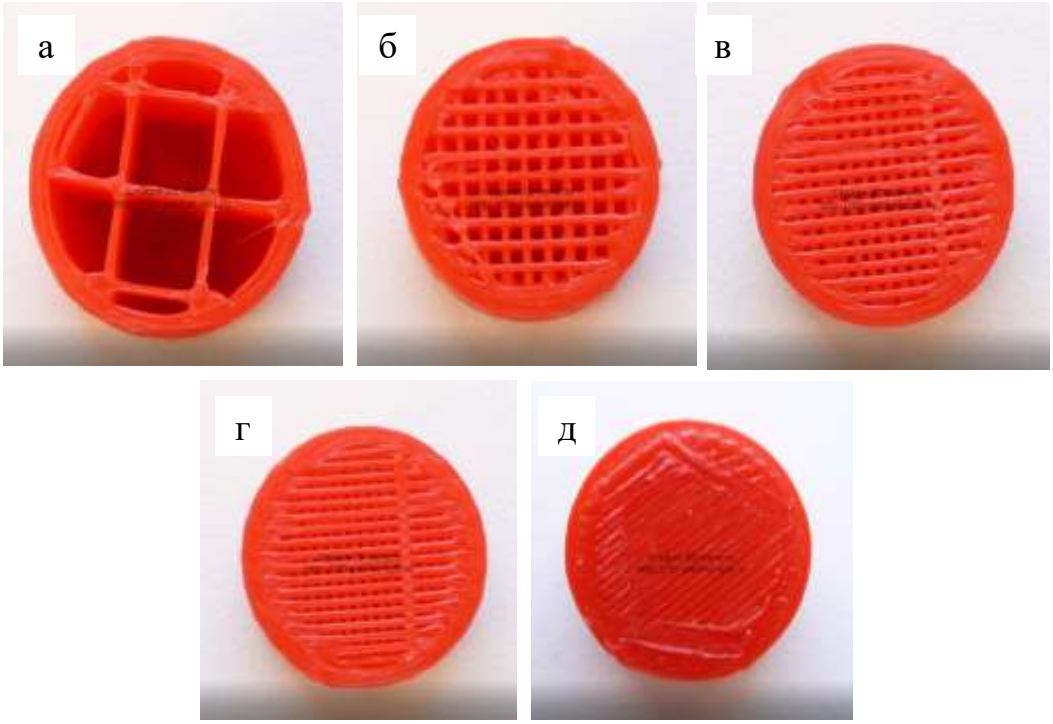


Рисунок 10.3 - Изделия с разным заполнением объема:
20% (а), 40% (б), 60% (в), 80% (г) и 100% (д) (FDM-технология)

Скорость печати тем больше, чем больше скорость перемещения экструдера в горизонтальной плоскости, т.е. чем больше скорость формирования слоев. Однако при слишком большой скорости перемещения экструдера, т.е. при слишком быстром наращивании слоев пластика возможен нежелательный перегрев пластика. Дело в том, что полимерное волокно, выходящее из экструдера, имеет определенную температуру (обычно в интервале 190-240°С). При такой температуре волокно находится в размягченном состоянии и ему можно легко придавать разные формы, в том числе укладывать по заданным контурам. По мере охлаждения волокно быстро становится твердым, так что приобретенная им форма фиксируется и ее уже практически невозможно изменить. Важно добиться таких температурных условий, при которых пластик мог свободно течь через сопло, а сразу же после укладки быстро затвердевать, обеспечивая требуемую точность размеров распечатываемой детали. В случае же перегрева волокно после укладки будет еще долго находиться в размягченном состоянии, что может приводить к деформациям детали. При слишком большой скорости перемещения экструдера могут возникать и другие нежелательные явления, например, смещения накладываемых друг на друга полимерных слоев.

Таким образом, желательно, чтобы скорость печати была настолько быстрой, насколько это возможно для используемого 3D-принтера, но без ущерба для качества печати.

Скорость печати для разных видов АМ-технологий может изменяться в довольно широких пределах в зависимости от особенностей реализации процессов послойного построения (в частности, от выбранной толщины наращиваемых слоев), от технических характеристик используемых 3D-принтеров, от свойств используемых строительных материалов. В табл. 10.1 приведены в качестве примера значения скорости печати (скорости послойного построения), которые могут достигаться при использовании разных видов АМ-технологий и разных типов (разных моделей) 3D-принтеров.

Таблица 10.1 - Скорость печати для разных видов АМ-технологий

АМ-технология	Модель 3D-принтера	Скорость печати, $см^3$/час
FDM	Picaso Designer XL	100
DLP	InnoventPro	166
SLA	Pegasus Touch	22
SLS	ZRapid SLS 300	80-130
SLM	SLM Solutions SLM 800	71
EBM	Arcam A2X	55-80
LOM	Matrix300+	60

Для некоторых АМ-технологий (FDM, MJM, SLA) при изготовлении изделий с выступающими (нависающими) частями необходимо создавать поддерживающие элементы (рис. 10.4), на что требуется дополнительное время. Кроме того, дополнительное время требуется для удаления поддержек после завершения печати. Все это ведет в целом к увеличению длительности процесса изготовления изделий, т.е. к снижению его производительности.

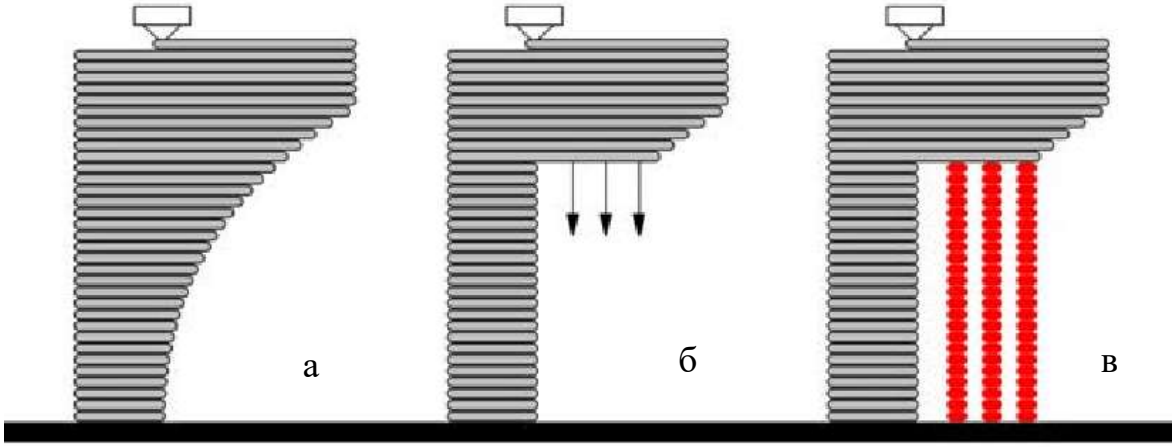


Рисунок 10.4 - Пример создания поддерживающей конструкции при послойном построении изделия с выступающей (навесной) частью: а

– поддержка не нужна, б – поддержка нужна, в – изделие с поддержкой (выделена красным)

Поддерживающие элементы могут создаваться из разных по свойствам материалов. Соответственно, после завершения печати они могут удаляться разными способами:

1) механическим путем (обламыванием, срезанием); например, при использовании FDM-технологии изделие делают из ABS-пластика, а поддержку – из более хрупкого PLA-пластика (рис. 10.5);

2) растворением химическими реактивами или обычной водой; например, при использовании FDM-, MJM-, SLA- и SLS-технологий изделие делают из нерастворимого в воде пластика, а поддержку – из водорастворимого PVA-пластика (рис. 10.6);

3) расплавлением с последующим вытеканием за счет нагрева потоком теплого воздуха; например, при использовании FDM-, MJM- и SLS-технологий изделие делают из сравнительного тугоплавкого пластика, а поддержку – из легкоплавкого воска с температурой плавления 60-100˚С.

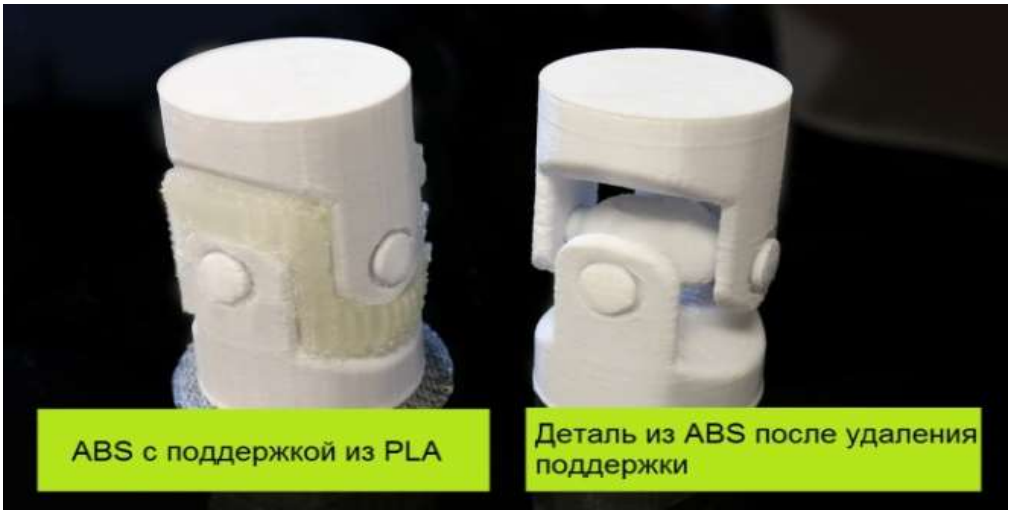


Рисунок 10.5 - Поддерживающие элементы, удаляемые механическим путем

Рисунок 10.6 - Поддерживающие элементы, удаляемые растворением

Как правило, нет необходимости создавать поддерживающие элементы при изготовлении изделий с помощью порошковых АМ-технологий, таких, как 3DP, SLS, SLM. Это объясняется тем, что поддерживающую роль играет порошок, который послойно накапливается в рабочей камере и окружает печатаемое изделие (рис. 10.7). После завершения печати изделие извлекается из камеры, а оставшийся в ней порошок направляется для использования при изготовлении следующих изделий.

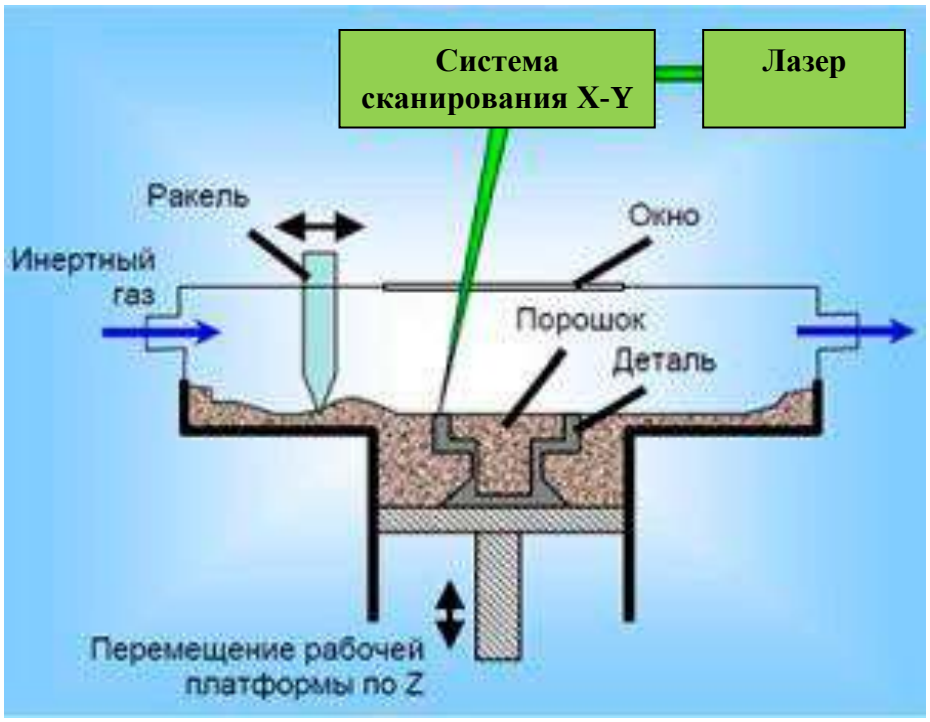


Рисунок 10.7 - Схема SLM-процесса: порошок играет роль поддержки при изготовлении изделия с выступающими (навесными) частями

Удаление поддерживающих элементов обычно рассматривается как операция постобработки. Существуют разнообразные виды постобработки, значительно увеличивающие длительность изготовления деталей с помощью АМ-технологий, например, постобработка может проводиться с целью улучшения качества поверхности или повышения прочности напечатанных деталей.

10.2 Себестоимость аддитивных технологических процессов

Себестоимость технологического процесса изготовления деталей, или, другими словами, технологическая себестоимость – это сумма

затрат на осуществление технологического процесса изготовления детали.

В технологическую себестоимость $C_т$ входят затраты на материалы $C_м$, энергию $C_э$, амортизацию оборудования $C_а$, заработную плату производственных рабочих $C_з$:

$$C_т = C_м + C_э + C_а + C_з.$$

Стоимость изделий, изготавливаемых с помощью АМ-технологий, обычно выражается в стоимости единицы объема, например, кубического сантиметра.

Для того чтобы уменьшить технологическую себестоимость, следует уменьшить входящие в нее составляющие, для чего, в свою очередь, надо знать факторы, которые могут оказывать на них влияние.

Затраты на материалы обычно связаны с расходованием строительного материала. Вместе с тем изготовление изделий сложных форм с помощью некоторых видов АМ-технологий может быть связано с расходованием вспомогательного материала, идущего на создание поддерживающих элементов.

Затраты на материалы зависят от объема материала, непосредственно используемого для построения изделия. Чем больше размеры изделия и чем больше степень его заполнения, тем большее количество материала идет на его построение.

Также затраты на материалы зависят от величины их отходов, которая может быть различной для разных видов АМ-технологий. Наименьшими отходами строительного материала отличаются порошковые АМ-технологии, поскольку после завершения печати оставшийся порошок поступает на повторное использование.

Важным фактором, влияющим на величину затрат на материалы, является стоимость материалов, которая для некоторых видов АМ-технологий может быть довольно значительной (табл. 10.2).

Таблица 10.2 - Стоимость строительных материалов для разных видов АМ-технологий

АМ-технология	Материал	Стоимость
FDM	Пластиковые нити: ABS PLA	 22 $ / 1 кг 33 $ / 1 кг
IJP	Воск VisiJet M3 CAST	930 $/ кг
3DP	Гипсовый порошок VisiJet PXL Core	130 $ / кг
SLA	Фотополимерная смола	150-750 $ / л
SLM	Порошки: титан сплав Inconel	 500 $ / кг 400 $ / кг

	нержавеющая сталь	300 $ / кг

Затраты на энергию связаны с работой технологического оборудования, прежде всего, 3D-принтеров, а также некоторых других видов оборудования, которое используется, в частности, для проведения постобработки. При этом затраты на энергию тем больше, чем больше потребляемая мощность и длительность работы оборудования.

Амортизация оборудованиядля большинства видов АМ-технологий вносит основной вклад в технологическая себестоимость, что обусловлено использованием дорогостоящих 3D-принтеров, стоимость которых существенно возрастает с увеличением рабочей зоны (области печати) (табл. 3). Например, большинство SLM-3D-принтеровстоят более 500 тыс. долл. США, а некоторые из них, имеющие значительные размеры рабочей зоны – более 1 млн. долл. США. Этим объясняется тот факт, что на сегодняшний день у многих 3D-принтеров размеры рабочей зоны сравнительно невелики.

Таблица 10.3 - Стоимость разных видов 3D-принтеров

АМ-технология	Модель 3D-принтера	Размеры зоны построения, мм^3	Стоимость, тыс.$
FDM	DeeGreen be3D	150x150x150	1,1
	Pharaoh ED 30 Mass Portal	300x300x300	6,7
IJP	Propjet MJP 2500	295x211x142	50
	Propjet MJP 3600W Max	298x183x203	120
3DP	Projet 860Pro	508×381×229	194
LOM	LOM 1015	350 x380x250	95
	LOM 2030	760x500x500	180
SLA	iPro 8000	650x750x550	680
	ProX 950	1500x750x550	1 297
SLS	EOSINT P760	700x380x580	800
SLM	SLM125	120×120×75	400-500
	SLM 280	280×280×350	750-1000
	SLM 500	500×280×325	1000-2000
EBM	Arcam EBM Spectra L	350×350×430	>250
LMD	X-series LMD	-	200
LENS	LENS 450	100×100×100	300
	LENS 850-R	900×1500×900	1200

Стоимость 3D-принтеров также возрастает с увеличением точности построения, разрешающей способности, быстродействия.

Среди всех типов 3D-принтеров весьма низкой стоимостью отличаются FDM-3D-принтеры, которые благодаря своей дешевизне, получили большое распространение.

Заработная плата производственных рабочих, участвующих в реализации АМ-технологий, тем выше, чем больше длительность

изготовления изделий, т.е. чем меньше производительность аддитивных технологических процессов.

Таким образом, из всех составляющих технологической себестоимости деталей, изготавливаемых с помощью АМ-технологий, наиболее значительной является амортизация оборудования.

Высокая стоимость большинства типов 3D-принтеров, а также строительных материалов является главной причиной, сдерживающей широкое применение АМ-технологий на производственных предприятиях, поскольку многие из них не могут позволить себе приобретение оборудования, стоимость которого исчисляется сотнями тысяч долл. США, а сроки окупаемости могут быть довольно длительными. С другой стороны, высокая стоимость 3D-принтеров, а также строительных материалов отражаются на стоимости производимых деталей, спрос на которые ограничен из-за их высокой цены.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется производительность аддитивных технологических процессов?
2. Какие факторы влияют на скорость 3D-печати?
3. Как определяется скорость 3D-печати?
4. Поясните, как скорость 3D-печати может зависеть от условий ее проведения на примере реализации FDM-технологии.
5. Для чего необходимы поддерживающие элементы при изготовлении изделий с помощью аддитивных технологий, как их можно создавать и удалять?
6. Назовите основные компоненты, входящие в структуру себестоимости технологического процесса 3D-печати.
7. От чего зависят затраты на материалы, используемые в аддитивных технологиях?
8. От чего зависят затраты на энергию, связанные с реализацией аддитивных технологий?
9. Поясните, почему из всех составляющих технологической себестоимости изделий, изготавливаемых с помощью АМ-технологий, наиболее значительной является амортизация оборудования?

11. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

11.1 Современные тенденции развития сельскохозяйственной техники

Важнейшим условием значительного повышения эффективности сельского хозяйства является переход к прогрессивным технологиям сельскохозяйственного производства. Одной из основных причин ограничений по вводу этих технологий является неразвитость инженерно-технической системы, для модернизации которой необходимо обновление технической базы сельского хозяйства, все более широкое использование передовой конкурентоспособной сельхозтехники.

Достижения современного технического прогресса в области сельхозтехники направлены на решение следующих задач:

- всемерное увеличение объемов производства сельхозпродукции, повышение продуктивности растениеводства и животноводства;
- повышение качества сельхозпродукции и сокращение ее потерь на всех этапах производства;
- более рациональное использование энергетических, материальных, трудовых, земельных, финансовых ресурсов;
- увеличение энергонасыщенности и энергообеспеченности сельскохозяйственного производства;
- повышение технического уровня, качества и надежности сельхозтехники на основе широкого применения при ее создании информатики, электроники, интеллектуальных, автоматизированных и роботизированных систем;
- обеспечение экологической безопасности сельскохозяйственного производства;
- создание комфортных и безопасных условий труда при эксплуатации, ремонте и техническом обслуживании сельхозтехники;
- широкое применение альтернативных источников энергии, систем точного растениеводства и животноводства.

Ниже рассмотрены основные тенденции развития сельхозтехники на примере тракторов и зерноуборочных комбайнов.

Тракторы

История тракторостроения показывает, что эксплуатационные требования к тракторам непрерывно повышаются. Вначале тракторы использовались как тяговые энергетические средства, т.е. предназначались для осуществления в основном тяговых функций. Соответственно, эффективная мощность двигателя трактора при расчете

его основных параметров определялась с учетом обеспечения необходимой силы тяги. При этом не предусматривались какие-либо резервы для отбора мощности двигателя трактора через механизмы привода активных рабочих органов сельскохозяйственных машин, агрегатируемых с трактором.

Со временем развитие тракторостроения привело к расширению функций тракторов и предъявляемых к ним эксплуатационных требований. В частности получило большое распространение агрегатирование тракторов с сельскохозяйственными машинами, обладающими активными рабочими органами, привод которых осуществляется от механизмов отбора мощности. Как следствие, кроме реализации требуемой силы тяги, трактору потребовалось иметь дополнительную мощность двигателя, для того чтобы обеспечивать технологический процесс машинно-тракторного агрегата, который может включать в свой состав не одну, а несколько рабочих машин. Создание таких агрегатов стало возможным на основе широкого использования автоматических устройств, с помощью которых обеспечивается управление работой агрегатов.

Сегодня название трактор в его прежнем понимании как тяговое энергетическое средство уже не отражает всех функций, которые он должен выполнять, поэтому тракторы принято рассматривать как мобильные энергетические средства с многообразием присущих им функций.

В современном тракторостроении отмечается нуклонный рост количества моделей выпускаемых тракторов. При этом развитие их конструкции идет по следующим основным направлениям:

- рост мощности двигателей, применение в них нетрадиционных видов топлива;
- расширенное применение и повышение надежности работы топливной аппаратуры, систем фильтрации и впуска воздуха, гидравлического оборудования, бесступенчатых трансмиссий тракторов, передних ведущих и подрессоренных мостов, тормозных устройств;
- снижение вредного воздействия (давления) на почву движителей, в частности, за счет расширенного применения гусеничных и трехосных колесных тракторов;
- расширенное применение пластмасс и новых материалов;
- все большее оснащение тракторов электронным оборудованием, системами автоматизированного и интеллектуального контроля и управления, в частности, для обеспечения эффективного управления подачей топлива, положением ходовой системы трактора при независимой подвеске, выравниванием кабины при работе на склонах, переключением передач под нагрузкой, системой гашения колебаний сидения тракториста, работой навесных и прицепных систем.

Зерноуборочные комбайны

Основные направления совершенствования комбайнов:

- повышение производительности, увеличение мощности двигателей, использование систем внедрение интеллектуального управления мощностью;
- уменьшение потерь и повреждений зерна;
- обеспечение высокой устойчивости технологического процесса уборки в разных агротехнических и климатических условиях;
- снижение вредного воздействия (давления) на почву движителей, в частности, за счет внедрения привода на все колеса и применения гусениц;
- расширенное применение компьютерных интеллектуальных систем, обеспечивающих контроля и управление технологическими процессами, высокую гармонизацию (синхронизацию) работы комбайнов с транспортными средствами.

По аналогичным направлениям происходит развития и других видов сельхозтехники.

Совершенствование почвообрабатывающих машин идет по пути повышения производительности обработки, создания новых рабочих органов, повышения их надежности. В частности, значительное внимание уделяется развития конструкций лемешно-отвальных плугов, включая: увеличение ширины захвата за счет роста количества корпусов; разработка плугов с регулируемой шириной борозды и переменным захватом; увеличение количества типоразмеров плужных корпусов, что позволяет более точно их подбирать для разных почвенно-климатических условий; расширенное применение оборотных или поворотных плугов; разработка модульной конструкции плугов, составленной собирать из отдельных блоков; применение современных материалов.

Совершенствование посевных машин предполагает повышение их универсальности в части высева различных сельскохозяйственных культур за счет оснащения сменными сошниковыми группами; разработку управляющих систем, позволяющих устанавливать требуемые расстояние технологической колеи и ширину следа, регулировать работу высевающих аппаратов; улучшение конструкции дозаторов, питателей, распределителей, сошников.

При создании машин для внесения твердых минеральных удобрений особое место отводится развитию центробежных разбрасывателей удобрений. Оно связано с увеличением скорости, ширины захвата и вместимости бункера; с повышением надежности за счет использования более прочных коррозионно-стойких материалов; улучшением элементов конструкции, обеспечивающих более равномерное распределение удобрений по ширине захвата и более точное дифференцированное дозирование на каждом конкретном участке обрабатываемого поля. В частности, важную роль играет

определение оптимальных конструктивных параметров, таких как: количество и форма лопаток, установленных на распределяющем диске, угол их установки, место подачи удобрений на диск; изменение угла наклона диска, направления вращения и формы дисков.

Совершенствование сельхозтехники предполагает решение задач повышения эффективности не только ее эксплуатации, но также производства, ремонта и технического обслуживания.

Для обеспечения производства передовой конкурентоспособной сельскохозяйственной техникой, повышения эффективности производственно-технологического потенциала, способного гибко реагировать на требования по обновлению выпускаемой техники, необходимо осуществлять техническое перевооружение предприятий сельхозмашиностроения на основе использования современных прогрессивных технологий.

Для обеспечения высокой работоспособности сельскохозяйственной техники необходимо поддерживать на высоком уровне функционирование материально-технической базы ее ремонта и обслуживания.

Со временем, в ходе эксплуатации сельскохозяйственная техника приходит в негодность. Для ее бесперебойной работы важно проводить своевременную замену деталей или узлов. Соответственно, необходимо организовать надежную систему производства запчастей и их доставки к месту ремонта. Кроме того, требует совершенствования деятельность ремонтных предприятий, а также ремонтно-обслуживающих подразделений сельскохозяйственных предприятий.

Одним из перспективных направлений развития производства и ремонта сельскохозяйственной техники является применение АМ-технологий.

11.2 Основные направления применения аддитивных технологий при производстве сельскохозяйственной техники

Актуальность производства сельхозтехники с помощью АМ-технологий обусловлена все возрастающими темпами ее обновления: совершенствования существующих и создания новых видов (моделей) техники.

Направления применения АМ-технологий при производстве сельхозтехники определяются с учетом конструктивных особенностей деталей и тех преимуществ, которые дает применение АМ-технологий. Основные их этих направлений представлены на рис. 11.1 и кратко рассмотрены ниже.

1. Изготовление прототипов деталей с помощью АМ-технологий обеспечивает повышение эффективности проектирования деталей при создании усовершенствованной или новой техники. При этом благодаря

3D-печати существенно упрощается и ускоряется работа инженеров-проектировщиков. Быстрое прототипирование играет особенно важную роль при существенном изменении конструкции разрабатываемых деталей (а также оснастки и инструмента), которое может иметь место благодаря использованию прогрессивных методов проектирования, таких как топологическая оптимизация и бионическое проектирование.

Рисунок 11.1 - Основные направления применения аддитивных технологий при производстве сельхозтехники (см. раздел 6)

Единичное производство характеризуется широкой номенклатурой изготовляемых изделий и малым объёмом их выпуска: количество выпускаемых изделий исчисляются штуками или десятками штук.

2. Изготовление более дешевых деталей является одним из главных преимуществ АМ-технологий, которое обычно наиболее заметно проявляется в условиях единичного производства, особенно в тех случаях, когда приходится изготавливать детали со сложной геометрией, которые трудно (или невозможно) изготовить с помощью традиционных технологий.

На машиностроительных предприятиях в условиях традиционного единичного производства технологический процесс является нестабильным, разнообразные технологические операции повторяются нерегулярно или вообще не повторяются, как следствие, отсутствует специализация рабочих мест.

Характерной чертой традиционного единичного производства является использование универсального оборудования и высококвалифицированных рабочих. Все это приводит к значительному повышению стоимости традиционного производства деталей, которая оказывается выше стоимости аддитивного производства.

3. Изготовление облегченных деталей обеспечивается благодаря их проектированию методами топологической оптимизации, вследствие чего конструкция деталей претерпевает существенные изменения, приобретает каркасный вид. В свою очередь, изготовление деталей с топологически оптимизированной конструкцией становится возможным благодаря использованию АМ-технологий.

В результате топологической оптимизации материал детали распределяется в ее объеме так, что он в основном остается в тех частях детали, которые подвергаются большим нагрузкам, и удаляется в тех частях, где эти нагрузки малы. При таком распределении материала не только обеспечивается снижение массы детали, но вместе с тем сохраняются ее прочностные свойства.

Топологическая оптимизация приводит к снижению массы деталей и экономии материала и, соответственно, к сокращению длительности и стоимости их изготовления. Облегчение конструкции имеет принципиальное значение для сельхозтехники, поскольку благодаря этому снижается вредное воздействие (давление) движителей на почву. Кроме того, облегчение конструкции навесных и прицепных устройств, агрегатируемых с трактором, способствует снижению тяговой нагрузки

трактора. Также облегчение конструкции транспортных средств обеспечивает улучшенные условия их эксплуатации в целом.

4. Изготовление деталей с улучшенными функциональными свойствами обеспечивается благодаря их бионическому проектированию, в результате чего деталям целенаправленно придаются конструктивные признаки, подобные тем, которые имеются у объектов живой природы. При этом могут изменяться определенным образом и внешняя форма, и внутреннее строение деталей. Методы бионического проектирования оказываются особенно эффективными при создании рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных машин, а также разнообразных деталей и узлов уборочных, транспортных и других машин, используемых в сельском хозяйстве.

Путь к широкому применению методов бионического проектирования, как и методов топологической оптимизации, открывается благодаря производству деталей с помощью АМ-технологий.

5. Объединение сборки в одну деталь, т.е. изготовление с помощью АМ-технологий деталей сложной конструкции, каждая из которых объединяет в себе несколько простых деталей, которые изготавливаются по традиционным технологиям в отдельности. Такой подход к проектированию и производству позволяет существенно упростить конструкцию создаваемых устройств, повысить их надежность, а также снизить расходы материалов, идущих на изготовление устройств. Применение такого подхода может иметь место при производстве как модернизируемой, так и вновь разрабатываемой сельхозтехники.

6. Изготовление оснастки с помощью АМ-технологий предполагает ее дальнейшее использование при производстве деталей по традиционным технологиям. Наиболее эффективно таким образом изготавливать разнообразную формообразующую оснастку, характеризующуюся сложными формами, например, литейную, штамповую и т.п., поскольку ее изготовление в обычных условиях представляет собой дорогостоящий и трудоемкий процесс. Применение АМ-технологий для изготовления технологической оснастки может быть эффективным как на производственных предприятиях, так и на ремонтных, когда возникает необходимость в изготовлении запасных деталей.

7. Изготовление инструмента, так же как и оснастки, с помощью АМ-технологий предполагает ее дальнейшее использование при производстве деталей по традиционным технологиям. Применение АМ-технологий для изготовления инструмента, так же как и оснастки, может быть эффективным как на производственных, так и на ремонтных предприятиях.

11.3 Основные направления применения аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники

Актуальность ремонта сельхозтехники с помощью АМ-технологий обусловлена необходимостью повышения эффективности внеплановых ремонтов сельхозтехники, вызванных ее отказами в работе из-за выхода деталей из строя вследствие изнашивания, повреждения, поломки. При этом благодаря применению АМ-технологий становится возможным восстанавливать пришедшие в негодность детали или изготавливать вместо них новые детали с меньшей длительностью и стоимостью.

Направления применения АМ-технологий при ремонте сельхозтехники определяются с учетом конструктивных особенностей и характера повреждений деталей и тех преимуществ, которые дает применение АМ-технологий. Основные из этих направлений представлены на рис. 11.2 и кратко рассмотрены ниже.

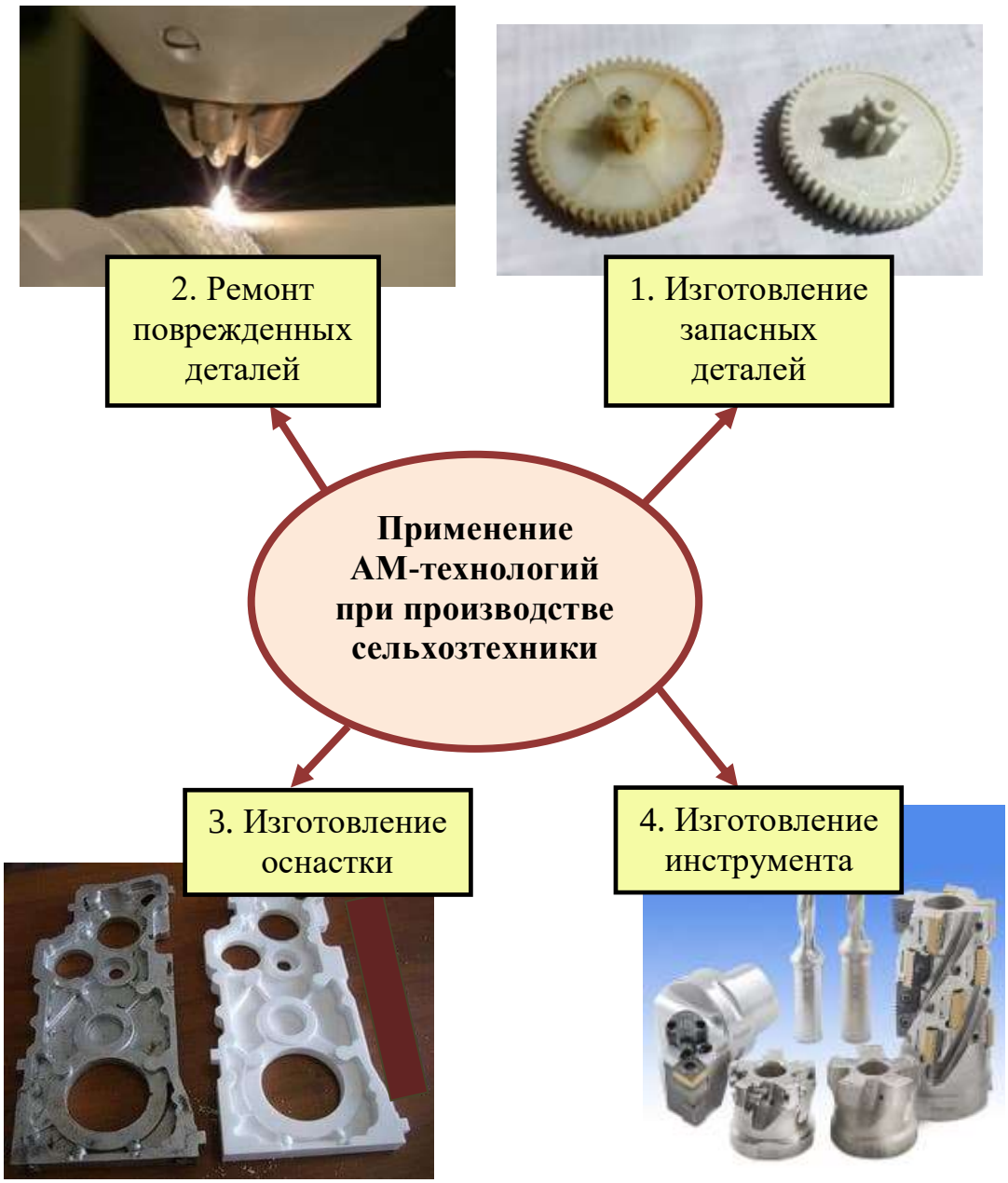


Рисунок 11.2 - Основные направления применения аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники (см. разделы 6-8)

1. Ремонт поврежденных деталей с помощью АМ-технологий предполагает восстановление изношенных деталей, а также поврежденных или сломанных деталей. При этом в соответствии с послойным принципом построения проводится локальное наращивание материала в местах износа, повреждений, сколов. Далеко не все выходящие из строя детали могут подлежать ремонту с помощью АМ-технологий, однако в тех случаях, когда такой ремонт выполняется, он оказывается обычно более быстрым и дешевым.

2. Изготовление запасных деталей с помощью АМ-технологий дает ремонтным предприятиям ряд преимуществ и в перспективе может

привести к значительным изменениям в организации всех ремонтных работ. При оценке этих преимуществ учитывается не только длительность и себестоимость изготовлении деталей по АМ-технологиям по сравнению с их изготовлением по традиционным технологиям (что характерно для производственных предприятий), но также условия ремонта, связанные с заменой деталей, вышедших из строя, на запасные детали.

3. Изготовление оснастки с помощью АМ-технологий осуществляется с целью ее дальнейшего использования для традиционного производства запасных деталей. На ремонтных предприятиях, также как и на производственных, наиболее эффективно применять АМ-технологии для изготовления формообразующей оснастки, служащей для получения деталей сложных форм

4. Изготовление инструмента с помощью АМ-технологий осуществляется с целью его дальнейшего использования для традиционного производства запасных деталей, как и в случае изготовления оснастки.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные задачи развития сельхозтехники.
2. Назовите основные тенденции развития тракторов.
3. Назовите основные тенденции развития зерноуборочных комбайнов.
4. Каковы основные направления совершенствования конструкции тракторов?
5. Каковы основные направления совершенствования конструкции зерноуборочных комбайнов?
6. Каковы основные направления совершенствования конструкции почвообрабатывающих машин?
7. Каковы основные направления совершенствования конструкции посевных машин?
8. Каковы основные направления совершенствования конструкции машин для внесения твердых минеральных удобрений?
9. Назовите основные направления применения аддитивных технологий при производстве сельхозтехники.
10. Назовите основные направления применения аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники.

12. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

12.1 Оценка эффективности применения аддитивных технологий при производстве сельскохозяйственной техники

С каждым годом растет число различных производственных предприятий, проявляющих заинтересованность в применении АМ-технологий. Главным фактором, сдерживающим их применение, является отсутствие у руководителей предприятий достаточных знаний о них, что затрудняет оценивать их достоинства и недостатки, выбирать из них наиболее приемлемые. Сложность оценки и выбора этих технологий обусловлена их многообразием.

В последние годы с целью содействия распространению АМ-технологий все больше консалтинговых компаний, специализирующиеся в сфере инновационного менеджмента, начинает консультировать предприятия по вопросам применения этих технологий; с другой стороны, фирмы, производящие АМ-оборудование, начинают открывать собственные консалтинговые подразделения. Это приводит к развитию различных методологий, направленных на более активное привлечение предприятий к применению АМ-технологий. Как правило, в этих методологиях уделяется внимание частным аспектам применения АМ-технологий: оценке экономических перспектив их применения; анализу организационных, технических, сбытовых и других факторов, стимулирующих их применение; подбору изделий, пригодных для изготовления с их применением; определению стоимости изготовления АМ-изделий. Все они в обобщенном виде представлены в методологии оценки целесообразности применения АМ-технологий, основу которой составляет следующий алгоритм информационно-аналитических мероприятий: 1) ознакомление с АМ-технологиями; 2) определение возможностей изготовления изделий с применением АМ-технологий, в том числе в сочетании с традиционными технологиями; 3) анализ экономических последствий применения АМ-технологий. При этом для повышения эффективности принимаемых решений о применении АМ-технологий предлагается использовать компьютерную систему поддержки принятия решений, позволяющую работать с базами данных, рассматривать различные сценарии развития производства с учетом соотношения производственных возможностей и требований к изготавливаемым изделиям, обосновывать принятие решений с помощью оптимизационных методов.

Для принятия решения о применении АМ-технологий при производстве конкретного изделия, например, детали сельхозмашины, следует предварительно рассмотреть ряд условий.

1. Типовыми условиями применимости АМ-технологий для изготовления изделия являются:

- наличие материалов, необходимых для изготовления изделия;

- соответствие размеров изделия техническим возможностям АМ-оборудования (размерам рабочей зоны 3D-принтеров), в том числе с учетом изготовления изделия отдельными частями с последующей сборкой.

2. Для оценки целесообразности (наличия перспективы) применения (рассмотрения вопроса о применении) АМ-технологий для изготовления изделия рекомендуется использовать следующие параметры:

- отношение массы материала заготовки изделия до обработки к массе готового изделия после обработки;
- длительность изготовления, отношение объема материала изделия к сроку изготовления изделия;
- стоимость изготовления, отношение стоимости изготовления изделия к объему изделия.

3. В качестве определяющих признаков целесообразности применения АМ-технологий для изготовления изделия рекомендуется рассматривать следующие условия:

- мелкосерийность производства (единичное производство);
- низкий уровень использования материалов для традиционных технологий производства, когда масса изготовленного изделия составляет менее 50% от массы исходного материала (заготовки);
- длительности изготовления изделия с применением АМ-технологий не более чем в два раза превышает длительность для традиционных технологий;
- стоимость изготовления изделия с применением АМ-технологий не более чем в два раза превышает стоимость для традиционных технологий.

Примечание: указанные признаки целесообразности определены с учетом возможности оптимизации конструкции изделия для АМ-технологий.

4. В качестве определяющих признаков нецелесообразности (отсутствия перспективы) применения (рассмотрения вопроса о применении) АМ-технологий следует рассматривать следующие условия:

- высокий уровень использования материалов для традиционных технологий производства, когда масса изготовленного изделия составляет более 50% от массы исходного материала (заготовки);
- длительности изготовления изделия с применением АМ-технологий более чем в два раза превышает длительность для традиционных технологий;
- стоимость изготовления изделия с применением АМ-технологий более чем в два раза превышает стоимость для традиционных технологий.

Рисунок 12.1 - Схема принятия решения о применении АМ-технологий

Решение о применении АМ-технологий для изготовления изделия рекомендуется принимать с учетом:

- типовых условий применимости АМ-технологий;
- результатов анализа оптимизации изделия для 3D-печати;
- результатов подготовки оптимизированного изделия для 3D-печати с учетом особенностей вида и конкретного 3D-принтера.

Типовой алгоритм принятия решений о применении АМ-технологий для изготовления изделия представлен схематически на рис. 12.1. На схеме обозначены четыре ключевые точки принятия решений.

Точка 1 – Решение по применимости.

На этом этапе принимается решение о целесообразности применения АМ-технологий в соответствии с условиями применимости.

Точка 2 – Решение по требованиям.

На этом этапе получена информация о нецелесообразности применения АМ-технологий и рассмотрена возможность изменения концептуальных требований к изделию, в частности:

- использование в конструкции изделия особых типов структур (каркасных, решетчатых сотовых, пенообразных);
- изменение подхода к формированию требований к изделию, например: изменение конструкции более крупного сборочного узла, элементом которого являлось изделие, объединение нескольких элементов сборки в один либо наоборот – разделения изделия на несколько элементов для последующей сборки (при условии обеспечения технической простоты и экономической целесообразности производственного процесса).

Точка 3 – Решение по оценке.

На этом этапе известны результаты оптимизации конструкции изделия, приблизительные оценки стоимости и времени изготовления изделия, основные функциональные показатели, на основании чего принимается решение по целесообразности осуществления процесса изготовления изделия с применением АМ-технологий.

Точка 4 – Решение по технологии.

На основании всех собранных данных о технических особенностях, стоимости, сроках изготовления и функционале изделия принимается решение об изготовлении изделия с применением АМ-технологий.

12.2 Оценка эффективности применения аддитивных технологий при ремонте сельскохозяйственной техники

Эффективность ремонта машин во многом зависит от уровня обеспеченности запчастями. Это обусловлено тем, что далеко не все детали, выходящие из строя, могут быть восстановлены и даже если некоторые из них подлежат восстановлению, то далеко не всегда это

восстановление оказывается экономически оправданным. Как следствие, большинство становящихся негодными деталей приходится заменять новыми деталями.

Анализ состояния современного ремонтного производства показывает, что при решении вопросов обеспечения запчастями нередко приходится сталкиваться со значительными трудностями. Традиционно запчасти изготавливаются и поступают в продажу разными по размеру партиями, которые зачастую подлежат длительному хранению. Запчасти привязывают к себе значительную часть финансовых средств, при этом довольно сложно предугадать, когда и сколько запчастей потребуется. Порой некоторые из них никогда не используются. Многие предприятия производят высоко кастомизированную продукцию, что еще больше увеличивает количество запчастей и, следовательно, усложняет управление запасами. По мере ускорения технического прогресса запчасти, длительно хранящиеся на складе, уже не будут соответствовать эксплуатационным требованиям на тот момент, когда они понадобятся. Предприятия также нередко вынуждены проводить ремонт машин, которые уже настолько устарели, что запчасти для них больше не существуют. В таких случаях приходится изготавливать запчасти по индивидуальным заказам, что является дорогостоящим и длительным процессом, особенно если для их изготовления требуются специальные инструменты, пресс-формы, литейные формы и т.п.

Вопросы обеспечения запчастями становятся крайне остро, когда надо проводить внеплановые ремонты машин, вызванные их отказами в работе. Затраты на приобретение запчастей составляют более 50% от стоимости ремонта, причем большинство последствий отказов устраняются благодаря использованию запчастей, например, у сельхозтехники они доходят до 70%.

Отказы машин в работе связаны с внезапным выходом из строя деталей по непредвиденным причинам, таким как нарушение правил эксплуатации машин, несвоевременное или некачественное техническое обслуживание и ремонт машин, заводской брак, стихийные бедствия и др.

Возникновению отказов машин способствуют сложные условия их эксплуатации. Так, на сельхозтехнику во время ее работы могут оказывать нежелательное влияние, повышающее вероятность ее отказов, погодно-климатические факторы (температура, влажность, запыленность воздуха, атмосферные осадки, солнечная радиация и др.); свойства почвы (плотность, влажность, содержание абразивных частиц, каменистость и др.); свойства растений (плотность, влажность, сопротивление резанию и транспортированию, способность прилипать к поверхности деталей и забивать рабочие органы и др.). Кроме того, причиной большой вероятности отказов машин являются чрезмерно

длительные сроки их эксплуатации, вследствие чего надежность машин снижается.

Как правило, многие детали агропромышленных машин и агрегатов испытывают значительные механические нагрузки, в том числе ударные и вибрационные. Детали узлов трения (подшипники скольжения; плунжеры насосов; манжетные уплотнения; уплотнительные кольца торцовых уплотнителей центробежных насосов, сепараторов, центрифуг; гильзы цилиндров-дозаторов; ножи резательных машин, мясорубок, волчков, куттеров и т.д.) подвергаются износу. Особенно значительный абразивный износ имеет место у деталей рабочих органов в результате взаимодействия с почвой, сельскохозяйственным сырьем, пищевыми продуктами или кормами (лемеха плугов, лапы культиваторов, диски борон, масловыжимные шнеки, винты гидравлических прессов, ножи кормоизмельчителей и т. д.).

Особенно актуально сокращать сроки обеспечения запчастями для нужд внеплановых ремонтов, когда простои внезапно отказавших машин вызывают большие производственные потери. Так, простой сельхозтехники в результате поломки на поле в период уборочных работ вызывает потери пшеницы более 25 кг/га в день, а ее простой на животноводческой ферме вызывает снижение удоя коров из-за несвоевременного кормления на 5% и более.

Если нужные для внеплановых ремонтов запчасти отсутствуют на складе, то их, как правило, приходится приобретать на стороне, поскольку далеко не каждое предприятие, осуществляющее ремонт, имеет возможности изготавливать запчасти собственными силами, особенно если они отличаются конструктивной сложностью. Однако нередко стоимость запчастей, изготавливаемых по традиционным технологиям, оказывается высокой, а сроки их изготовления – длительными. В таких случаях может оказаться весьма эффективным изготовление запчастей с помощью АМ-технологий.

Применение АМ-технологий позволяет сократить расходы на внеплановые ремонты машин, связанные приобретением запчастей, исключить вероятность сверхнормативного простоя машин в ремонте из-за нехватки запчастей и ускорить выпуск машин с неплановых ремонтов, упростить инфраструктуру материально-технического обеспечения ремонтного производства. Предприятия, осуществляющие ремонт, могут за счет применения АМ-технологий создавать собственные склады запчастей или пользоваться услугами специализированных фирм, изготавливающих детали на основе АМ-технологий. При этом для получения требуемой детали достаточно переслать ее электронную 3D-модель в одну из таких фирм. В результате упрощается логистика и сокращается время поставки запчастей, ускоряется ремонт и уменьшаются объемы складских запасов. Таким образом, применение АМ-технологий в ремонтном

производстве может привести к кардинальному изменению принципов организации всей работы ремонтных предприятий.

Изготовление запчастей с помощью АМ-технологий может осуществляться как на предприятиях, производящих машины, так и на предприятиях, выполняющих ремонт машин, при условии, что эти предприятия имеют необходимое АМ-оборудование. При этом ремонт машин может проводиться как на ремонтных предприятиях, так и в ремонтных подразделениях предприятий, эксплуатирующих машины. Кроме того, запчасти могут изготавливаться на специализированных предприятиях, занимающихся аддитивным производством и оказывающих услуги другим предприятиям по изготовлению различных деталей, в том числе запчастей, с помощью АМ-технологий.

Таким образом, имеются широкие возможности изготовления различных деталей машин, в том числе запчастей, с помощью АМ-технологий, эффективность которого может быть различной – в зависимости от того, какие виды АМ-технологий, а также какие модели 3D-принтеров соответствующих типов используются. Поэтому при решении вопросов об изготовлении запчастей с помощью АМ-технологий важно знать достоинства и недостатки разных видов АМ-технологий и уметь выбирать те из них, применение которых будет наиболее эффективным.

Выше, при рассмотрении вопросов применения АМ-технологий при производстве деталей сельхозтехники, упоминались различные методологии оценки целесообразности этого применения. Соответственно, все эти методологии предполагают применение АМ-технологий на промышленных предприятиях, производящих изделия и планирующих создание новых производств на основе применении этих технологий.

Вместе с тем имеется много предприятий, у которых нет необходимости в производственном освоении АМ-технологий, так как у них в силу специфики их деятельности не предусмотрен выпуск промышленных изделий. Типичный тому пример – сельскохозяйственные предприятия, имеющие в своем распоряжении большой парк эксплуатируемых машин, для внепланового ремонта которых приходится приобретать запасные детали, в том числе путем их изготовления на стороне с применением АМ-технологий. К подобным предприятиям относятся транспортные, мелиоративные, лесозаготовительные, дорожно-строительные и др. Руководители таких предприятий должны иметь аргументированные основания для принятия решений по приобретению запасных деталей, изготавливаемых с применением АМ-технологий.

Ниже рассмотрена методология оценки экономической эффективности применения АМ-технологий для изготовления запчастей для внепланового ремонта машин. Она предназначена к

непосредственному пользованию предприятиями, эксплуатирующими различные машин и нуждающимися в обеспечении запчастями их внепланового ремонта.

Согласно этой методологии предусматривается следующий алгоритм информационно-аналитических мероприятий:

1) определение принципиальных возможностей изготовления запчастей с применением АМ-технологий;

2) определение возможных видов АМ-технологий, позволяющих изготовитьзапчасти требуемого качества, в том числе в сочетании с традиционными технологиями (Т-технологиями);

3) определение возможных предприятий-изготовителей запчастей;

4) определение возможных способов доставки изготовленных запчастей; определение затрат, связанных с внеплановым ремонтом машин, для разных вариантов изготовления запчастей (для разных видов применяемых АМ-технологий и/или Т-технологий, а также для разных предприятий-изготовителей и способов доставки запчастей).

Для конкретных случаев внепланового ремонта решения о целесообразности применения АМ-технологий для изготовления запчастей по одному из возможных вариантов изготовления принимаются по результатам сравнительной оценки затрат, связанных с ремонтом, а именно: выбирается тот вариант изготовления, для которого затраты предприятия, осуществляющего ремонт, оказываются наименьшими.

В общем случае решение о применении АМ-технологий для изготовления запчастей принимается при условии

$$З_{РАМ} < З_{РТ}, \qquad (1)$$

где $З_{РАМ}$ и $З_{РТ}$ – общие затраты, связанные с ремонтом, заключающимся в замене неисправной детали на запчасть, изготовленную с применением АМ-технологии (АМ-запчасть) или Т-технологии (Т-запчасть);

$З_{РАМ} = С_{АМ} + Д_{АМ(t)}t_{ДАМ} + П_{(t)}(t_{РАМ} + t_{ИАМ} + t_{ДАМ}) + Р$;

$З_{РАМ} = С_{Т} + Д_{Т(t)}t_{ДТ} + П_{(t)}(t_{РТ} + t_{ИТ} + t_{ДАМ}) + Р$;

$С_{Ам}$ и $С_{Т}$– покупная стоимость запчасти;

$Д_{(t)}$ – затраты по доставке запчасти в единицу времени;

$П_{(t)}$ – ущерб из-за простоя в единицу времени, включая расходы, понесенные из-за простоя, и доходы, неполученные из-за простоя;

$t_{Р}$ – длительность ремонтных работ;

$t_{ИАМ}$ и $t_{ИТ}$ – длительность изготовления запчасти;

$t_{ДАМ}$ и $t_{ДТ}$ – длительность доставки запчасти;

$Р$– затраты на ремонтные работы по замене неисправной детали на запчасть.

Предполагается, что значения $Д_{(t)}$, $П_{(t)}$, $t_Р$ и $Р$ одинаковы как для АМ-запчасти, так и для Т-запчасти. С учетом этих предположений выражение (1) в развернутом виде можно представить следующим образом:

$$C_{АМ} + Д_{(t)}t_{ДАМ} + П_{(t)}(t_{ИАМ} + t_{ДАМ}) < C_Т + Д_{(t)}t_{ДТ} + П_{(t)}(t_{ИТ} + t_{ДАМ}) \qquad (2)$$

В отдельных случаях возможны упрощенные условия принятия решения о применении АМ-технологий для изготовления запчастей. Ниже рассмотрены два наиболее характерных случая.

Случай 1. Т-запчасть поставляется не индивидуально, а в составе узла или в комплекте с другими запчастями, причем покупная стоимость узла или комплектанамного больше, чем отдельной АМ-запчасти. Если при этом значения $Д_{(t)}$ и $П_{(t)}$ малы, то основанием для принятия решения о применении АМ-технологий для изготовления запчастей будет выполнение условия

$$C_{АМ} << C_{Т\Sigma}, \qquad (3)$$

где $C_{Т\Sigma}$ – покупная стоимость узла или комплекта, содержащего Т-запчасть.

Случай 2. Длительность приобретения Т-запчасти намного больше, чем АМ-запчасти и, соответственно, длительность простоя, связанного с приобретением Т-запчасти, намного больше, чем длительность простоя, связанного с приобретением АМ-запчасти. Если при этом значение $П_{(t)}$ велико, то основанием для принятия решения о применении АМ-технологий для изготовления запчастей будет выполнение условия

$$t_{ПАМ} << t_{ПТ}, \qquad (4)$$

где $t_{ПАМ}$ и $t_{ПТ}$ – длительности приобретения запчастей ($t_{ПАМ} = t_{ИАМ} + t_{ДАМ}$ и $t_{ПТ} = t_{ИТ} + t_{ДТ}$).

Очевидно, что условие (4) будет выполняться, если $t_{ИАМ} << t_{ИТ}$ и/или $t_{ДАМ} << t_{ДТ}$. Соотношение $t_{ИАМ} << t_{ИТ}$ свидетельствует о том, что АМ-технологии по производительности намного превосходят традиционные технологии изготовления деталей, что действительно имеет место в производственно практике. В свою очередь, соотношение $t_{ДАМ} << t_{ДТ}$ свидетельствует о недостаточно развитой инфраструктуре снабжения Т-запчастями, а также о большой удаленности предприятий-изготовителей Т-запчастей.

Условие (4) означает, что ущерб из-за простоя, связанного с длительным приобретением Т-запчасти, т.е. значение $П_{(t)}(t_{ИТ} + t_{ДАМ})$, оказывается настолько большим, что по сравнению с ним затраты на

приобретение АМ-запчасти уже не играют сколь бы то ни было существенной роли и главной задачей становится как можно скорее изготовить АМ-запчасть и доставить ее к месту ремонта.

Правильность и быстрота принятия решений о применении АМ-технологий для изготовления запчастей согласно рассматриваемой методологии могут быть обеспечены использованием *с*истем поддержки принятия решений СППР.

Контрольные вопросы

1. Укажите типовые условия применимости аддитивных технологий для изготовления изделия.
2. Какие параметры следует использовать для оценки целесообразности применения аддитивных технологий для изготовления изделия?
3. Назовите определяющие признаки целесообразности применения аддитивных технологий для изготовления изделия.
4. Какие факторы следует учитывать при принятии решения о применении аддитивных технологий для изготовления изделия.
5. Укажите основные элементы схемы принятия решения о применении аддитивных технологий для изготовления изделия.
6. В таких случаях может быть эффективным изготовление запчастей с помощью аддитивных технологий?
7. Опишите алгоритм информационно-аналитических мероприятий по оценке экономической эффективности применения АМ-технологий для изготовления запчастей для внепланового ремонта машин.

13. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

13.1 История терминологии в области аддитивных технологий

В 1980-х годах, когда аддитивные технологии только зарождались и начинали развиваться, считалось, что они не имеют больших перспектив практического применения и годятся только для изготовления функциональных или эстетических прототипов изделий, создаваемых по традиционным технологиям. Соответственно, в то время для обозначения этих новых технологий был предложен термин «быстрое прототипирование» («Rapid Prototyping»).

В те же 1980-е годы был введен в употребление термин «послойный синтез», который отражает техническую сущность процессов аддитивного построения изделий. В основном этот термин получил распространение в русскоязычной литературе, где его можно встретить и сейчас. За рубежом иногда используется аналогичный термин «послойная печать» («L*ayer*-by-L*a*yer Printing»).

С середины 1990-х годов начал получать все большее распространение термин «3D-печать» («3D-printing»), который первоначально относился к разработанному в 1993 г. процессу струйной печати трехмерных объектов, осуществляемому по аналогии с процессом обычной струйной печати двумерных объектов. Соответственно, в это же время появился термин «3D-принтер», под которым понимается устройство для 3D-печати (по аналогии с термином «2D-принтер», под которым понимается устройство для 2D-печати, т.е. обычный принтер, печатающий на бумаге).

Позднее, в 2000-х годах, по мере развития технологий 3D-печати и расширением сферы их применения приобрело популярность их новое название – «аддитивные технологии» (Additive Technologies), а также аналогичное название «аддитивное производство» (Additive Manufacturing).

К началу 2010-х годов термины «3D-печать» и «аддитивное производство» начали употребляться как синонимы, приобретя тот общий смысл, который в них вкладывается в настоящее время, а именно: создание трехмерных объектов путем последовательного (послойного) добавления (наращивания)материала. Вместе с тем между этими терминами все же имеются некоторые различия. Термин «3D-печать» применяется более часто, его употребляют в широких кругах населения, преимущественно на бытовом уровне, когда речь идет о сравнительно дешевых 3D-принтерах, которые могут себе позволить домашние пользователи, а также пользователи, обладающие недостаточно высокими профессиональными навыками. В свою очередь, термин «аддитивное производство» обычно применяется, когда речь идет об

изготовлении изделий в промышленных условиях с помощью высокопроизводительных профессиональных 3D-принтеров.

Что же касается термина «быстрое прототипирование», то в настоящее время он продолжает употребляться, как и прежде, но при этом технологии быстрого прототипирования рассматриваются как часть АМ-технологий, позволяющих создавать не только прототипы изделий, но и готовые изделий. Кстати, интересно заметить, что с 1995 г. издается международный научный журнал «Rapid Prototyping Journal». Это один из ведущих журналов в мире, где публикуются статьи по аддитивным технологиям, несмотря на то, что когда-то предложенное журналу название сегодня не отражает всю широту тематики представляемых в нем публикаций. К другим терминам, являющимся синонимами «аддитивного производства», относятся:

- «настольное производство» («DesktopManufacturing»),
- «быстрое производство» («RapidManufacturing»),
- «быстрая оснастка» или «быстрый инструмент» (RapidTooling»),
- «производство по требованию» («On-DemandManufacturing»),
- «изготовление твердых объектов произвольной формы» (*«*Solid-FreeformFabrication»).

Все эти термины возникли раньше, чем появились и получили распространение ныне популярные термины«3D-печать» и «аддитивное производство». Сейчас они используются редко или вообще не используются. Термин «настольное производство» был предложен по аналогии с термином «настольный компьютер».

Термин «быстрое производство» явился логическим преемником термина «быстрого прототипирования», он был принят, чтобы показать, что процессы послойного синтеза в своем применении вышли за рамки изготовления прототипов и начали все более широко применяться непосредственно для изготовления готовых изделий.

Термины «быстрая оснастка» или «быстрый инструмент» были введены в употребление, чтобы показать, что процессы послойного синтеза могут применяться для изготовления не только прототипов, но также технологической оснастки и обрабатывающих инструментов.

Введение терминов «быстрое производство» и «производство по требованию», т.е. добавление прилагательных «быстрый» и «по требованию» к существительному «производство» отражало изменения в характере индустриального развития, которому до недавнего времени была присуща большая длительность разработки и освоения производства новой продукции, включая подготовку конструкторско-технологической документации, изготовление оснастки и инструмента и т.д.

Термин «Solid Freeform Fabrication» произошел от названия симпозиума в Техасском университете в Остине (США), посвященного технологиям послойного синтеза. Этот симпозиум впервые был

организован в 1989 году, а затем неоднократно проводился в последующие годы.

13.2 Предпосылки развития аддитивных технологий

Считается, что предшественниками современных АМ-технологий являются две технологии, появившиеся в XIX веке. Одна из них относится к созданию топографических макетов, другая – к созданию фотоскульптур.

Топографический макет

В 1890 г. Блантер (Blanther) запатентовал послойный способ создания топографических макетов, т.е. трехмерных карт, отображающих рельеф местности (рис. 13.1). Предложенный способ заключался в нанесении топографических контурных линий на ряд восковых пластин и последующей резке этих восковых пластин по нанесенным линиям. После укладки восковых выкроек получали формы, которые затем использовали в качестве штамповой оснастки. Формы содержали положительные или отрицательные трехмерные поверхности, которые по своей геометрии соответствовали местности, обозначенной контурными линиями. Таким образом, одна из форм играла роль пуансона, а другая – роль матрицы. После предварительной упрочняющей обработки поверхностей между ними размещали лист бумаги, который в результате штампования превращался в бумажный вариант ландшафта.

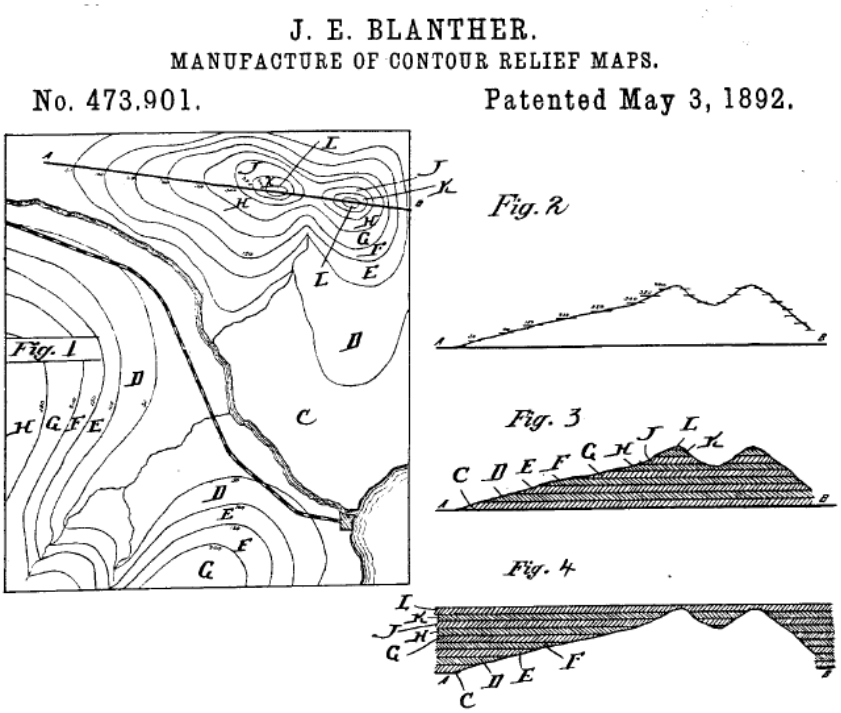


Рисунок 13.1 - Блантер Ж.Е. Патент США 473901, выдан 03.05.1892 г.

В 1940 г. Перера (Perera) запатентовал способ изготовления трехмерных карт местности путем контурного раскроя листов картона, а затем их укладки и склеивания. В 1964 г. этот подход усовершенствовал Занг (Zang), предложивший использовать прозрачные пластины с нанесенными на каждую пластину топографическими деталями, а в 1973 г. – Гаскин (Gaskin), который описал трехмерное геологическое обучающее устройство.

В 1972 г. Мацубара предложил аналогичный способ, отличающийся тем, что основан на использовании фотоотвердевающих материалов. Согласно этому способу фотополимерная смола наносится на слой порошка (например, из графита или песка). Затем свет от ртутной лампы селективно проецируется на этот слой, в результате фотополимер на засвеченном участке слоя затвердевает. Незасвеченная и, соотвественно, незатвердевшая часть слоя растворяется растворителем. Образованные таким образом тонкие слои впоследствии укладываются в стопку.

В 1974 г. ДиМаттео (DiMatteo) обратил внимание на то, что рассматриваемый способ укладки листовых выкроек может быть использован для изготовления изделий со сложными криволинейными поверхностями, которые крайне трудно изготовить с помощью традиционных операций механической обработки. Примеры таких изделий – пропеллеры, трехмерные кулачки, штамповая и литейная оснастка. Изделия получали из металлических листов, которые подвергали контурному раскрою фрезой, после чего листовые выкройки пакетировали и соединяли между собой с помощью клея или болтов (рис. 13.2).

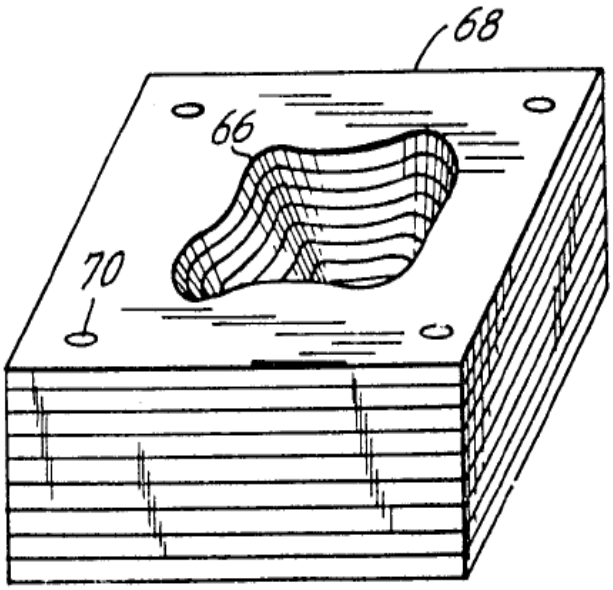


Рисунок 13.2 - Матрица для литья, составленная из металлических листовых выкроек (DiMatteo, P.L. Method of generating and constructing three-dimensional bodies, US Patent 3,932,923, 1976)

Таким образом, фактически была разработана технология, известная в настоящее время под названием технологии листового ламинирования (Sheet Lamination).

В 1979 г. Накагава начал использовать эту технологию для производства обрабатывающих инструментов, в частности, инструментов для вырубки штамповки. В 1985 г. Накагава, используя эту технологию, изготовил оснастку для литья под давлением.

Фотоскульптура

В 1860 г. Виллем (Willeme) разработал способ создания фотоскульптур. Согласно этому способу фотоскульптура создавалась путем одновременного фотографирования изображаемого объекта с помощью большого числа (у Виллема их было 24) фотоаппаратов, расположенных вокруг объекта. Затем мастер вырезал 1/24-ю цилиндрическую часть фигуры в модельном материале (например, глине или древесине), используя силуэт (контур) каждой фотографии, как показано на рис. 13.3.

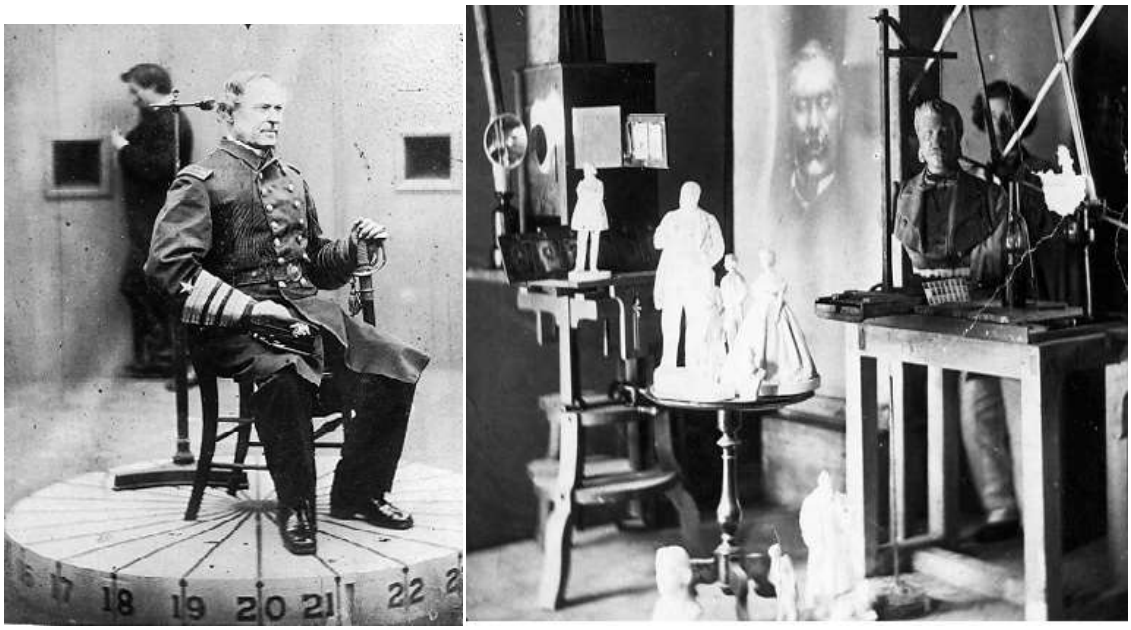


Рисунок 13.3 - Создание фотоскульптур по способу Виллема

В последующие годы этот способ неоднократно совершенствовался разными изобретателями.

В 1951 г. Мунц (Munz) запатентовал способ построения 3D-объектов, имеющий черты современной техники стереолитографии. Он делал селективное экспонирование прозрачной фотоэмульсии послойным образом, так что каждый слой получался из поперечного

сечения сканируемого объекта. Слои образовывались за счет опускания поршня в цилиндре и добавления соответствующих количеств фотоэмульсии и фиксирующего агента. В результате после экспонирования и фиксации в объеме цилиндра формировалось изображение объекта, которое впоследствии можно было вырезать вручную или вытравить фотохимическим путем.

13.3 Важнейшие этапы развития аддитивных технологий

Общепринято считать, что веха, ознаменовавшая начало аддитивного производства, произошла 9 марта 1983 года в США, когда Ч.У. Халл (Hull) успешно напечатал изделие в виде чашки на первой системе аддитивного производства – построенном им самим стереолитографическом аппарате.

В то время Халл работал в компании Ultraviolet Products, производившей лампы ультрафиолетового (УФ) излучения и светочувствительные к этому излучению полимеры (фотополимеры). Эти материалы покупали мебельные фабрики, поскольку они заменяли обычные лаки и краски для дерева. Фотополимеры в жидком состоянии наносились на столешницу или деревянную плиту, а затем затвердевали под действием УФ излучения. В результате получались прочные пластиковые покрытия.

Халл, проводивший испытания этих материалов, поставил вопрос: что будет происходить, если подвергать УФ облучению не один слой полимера, а несколько последовательно наносимых слоев? Ведь если наращивать друга на друга слои полимера, поочередно отверждая их за счет селективного действия УФ излучения, то можно формировать пластиковые изделия любой заданной формы. Так родилась идея нового способа создания изделий.

В 1984 г. Халл разработал технологию изготовления 3D-изделий путем отверждения жидких фотополимеров с помощью лазерного ультрафиолетового излучения, т.е. SLA-технологию. По его предложению эта технология получила название «стереолитография». В 1986 г. она была запатентована. В этом же году Hull основал компанию 3D Systems, которая выпустила первый коммерческий 3D-принтер SLA-1 и, таким образом, первой в мире приступила к коммерческой деятельности в области технологий послойного синтеза.

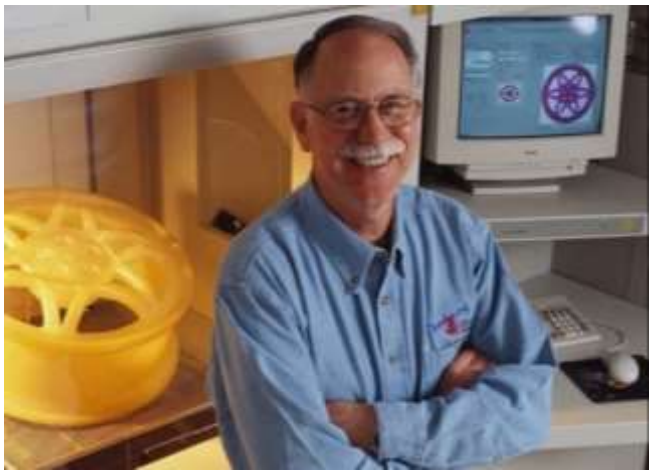


Рисунок 13.4 - Изобретатель SLA-технологии Чак Халл

С тех пор был сделан ряд изобретений, которые проложили путь к тому, что сегодня известно как аддитивное производство (табл. 13.1). Основные этапы развития АМ-технологий перечислены ниже в хронологическом порядке.

В 1986 г. в компании Cubital (Израиль) разработана DLP-технология (в 2012 г. в связи с прекращением существования компании Cubital ее права по коммерциализации DLP-технологии перешли к корпорации Stratsasys). Годом позже, в 1987 г. в компании TexasInstruments (США) разработана DLP-технология. Обе эти технологии представляют собой модифицированные вариант SLA-технологии.

В 1986 г. М. Фейгин (Feygin) изобрел LOM-технологию. Коммерциализацией этой технологии занималась фирма Helisys (США), которая в 2000 г. прекратила свое существование, а ее преемником стала компания Cubic Technologies (США).

В 1986 г. К.Р. Декард (Deckard) разработал SLS-технологию. Эта технология продвигалась на рынок фирмой Desktop Manufacturing (США), которая в 2001 г. была выкуплена компанией 3D Systems (США).

Таблица 13.1 - Ключевые изобретения в области аддитивных технологий

Техно-логия	Изобрета-тели	Название / номер патента	Центр разработки	Дата подачи патентной заявки
SLA	C. Hull	Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography / US4575330 A	3D Systems, США	08.08.1984
LOM	M. Feygin	Apparatus and method for forming an integral object from laminations / US4752352A	Cubic Technologies, США	06.06.1986
SLS	C. Deckard	Apparatus for producing parts by selective sintering / US5597589A	Техасский университет в Остине,США	17.10.1986
FDM	S. Crump	Apparatus and method for creating three-dimensional objects	Stratasys, США	30.10.1989

		/ US5121329A		
3DP	E. Sachs, J. Hagger-ty, M. Cima, P. Williams	Three-dimensional printing techniques / US5204055A	Массачусетский технологический институт, США	02.12.1989

С 1989 г. SLS-технология получила развитие в Германии, где Г. Лангер (Langer) основал компанию EOS (Германия) по выпуску SLS-оборудования.

В 1989 г. С. Крамп (Crump) изобрел FDM-технологию. Он же основал фирму Stratasys (США), которая с 1992 г. начала выпуск FDM-3D-принтеров.

В 1993 г. Э. Сакс (Sachs) разработал 3DP-технологию, относящуюся к категории технологий Binder Jetting. Он же впервые предложил термин «3D-печать». В 1995 г. компания Z Corporation (США)начала производить 3D-принтеры, реализующие эту технологию.

В 1995 г. в Германии группой изобретателей в Институте Фраунгофера в Аахене разработана SLM-технология.

В 1996 г. в Национальной лаборатории Сандия (США) изобретена DIW-технология.

В 1999 г.,Д. Уайт (White) разработал UAM-технологию, являющуюся модифицированным вариантом LOM-технологии. Коммерциализацией UAM-технологии занималась основанная им компания Solidica (США). В 2011 г. была создана компания Fabrisonic (США) для выпуска усовершенствованного UAM-оборудования.

В 2002 г. фирма Arcam (Швеция) начала производить оборудование для реализации EBM-технологии. В 2016 г. фирма Arcam была приобретена компанией GE Additive (США), которая на сегодняшний день является ведущим производителем EBM-оборудования.

В настоящее время AM-технологии постоянно развиваются, совершенствуются существующие и разрабатываются новые их виды. С каждым годом растет число производителей и потребителей AM-оборудования.

Контрольные вопросы

1. Объясните условия появления термина «быстрое прототипирование».
2. Чем различаются термины «3D-печать» и «аддитивное производство»?
3. Как соотносятся между собой термины «быстрое прототипирование» и «аддитивное производство»?

4. Охарактеризуйте многообразие терминов, аналогичных термину «аддитивное производство».
5. Укажите две технологии, которые явились предшественниками современных аддитивных технологий?
6. Назовите ключевые изобретения в области аддитивных технологий.
7. Какое изобретение принято считать вехой, ознаменовавшей начало аддитивного производства?
8. В каких странах аддитивные технологии первоначально получили основное развитие?

14. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

14.1 Основные особенности рынка аддитивных технологий

Прогнозирование развития АМ-технологий осуществляется, исходя из результатов анализа рынка этих технологий, который обычно проводится специализированными формами. На рис. 14.1-14.4 приведены результаты аналитических исследований, учет которых позволяет судить о возможных тенденциях мирового развития АМ-технологий в ближайшие годы. Результаты анализа показывают, что среди разных видов АМ-технологий доминирует FDM-технология, за ней идут с заметным отрывом SLA- и DLP-технологии. Таким образом, на первых местах находятся АМ-технологии изготовления пластиковых изделий. Далее следуют SLS-, SLM- и DMLS-технологии, т.е. лазерно-порошковые АМ-технологии. Необходимо отметить, что указанные технологии применяются компаниями преимущественно в рамках совершенствования собственных производств. Вместе с тем применение ряда АМ-технологий (SLS, SLA, MJF, Polyjet, SLM, DMLS, BJ и др.) значительно расширяется благодаря аутсорсингу, т.е. передаче одной компанией на основании договора определённых видов или функций производственной деятельности другой компании. АМ-технологии используются в основном для разработки, создания и тестирования прототипов и проведения научных исследования. Хотя в последние годы они находят все большее применение для непосредственного изготовления готовых изделий. Как правило, АМ-технологии применяются в сочетании с традиционными технологиями обработки материалов. К наиболее распространенным технологиям, используемым вместе с АМ-технологиями на производственных предприятиях, относятся лазерная резка и ЧПУ-фрезеровка.

АМ-технологии играют важную роль в бизнес-стратегиях, обеспечивая в большинстве случаев существенные конкурентные преимущества. Следствием этого является повышение интереса к

применению аддитивного производства у большинства компаний, которые неуклонно увеличивают инвестиций в 3D-печать. Более 50% компаний отмечают, что благодаря применению AM-технологий значительно сокращается время производства, увеличиваются темпы разработки новых видов продукции. Для ряда компаний 3D-печать превращается в основной вид деятельности. Вместе с тем около 10% компаний затрудняются оценить успешность использования 3D-печати. Считается, что основными факторами, сдерживающими применение AM-технологий, являются высокий порог входа (т.е. большие затраты времени и финансов, необходимые для того, чтобы начать работать самостоятельно); недостаток знаний об особенностях 3D-печати; недостаточная надежность существующих AM-технологий.

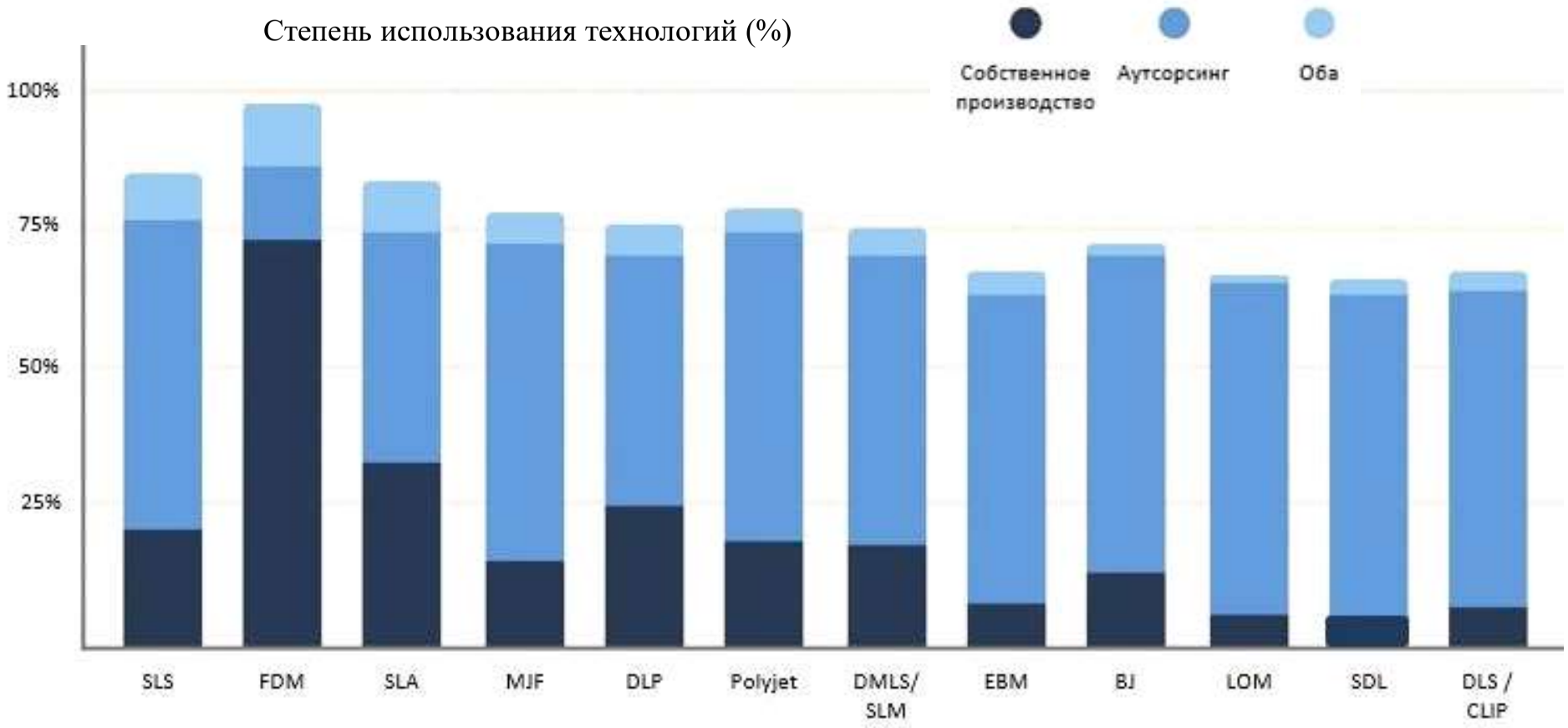


Рисунок14.1 - Характер и степень применения разных видов аддитивных технологий

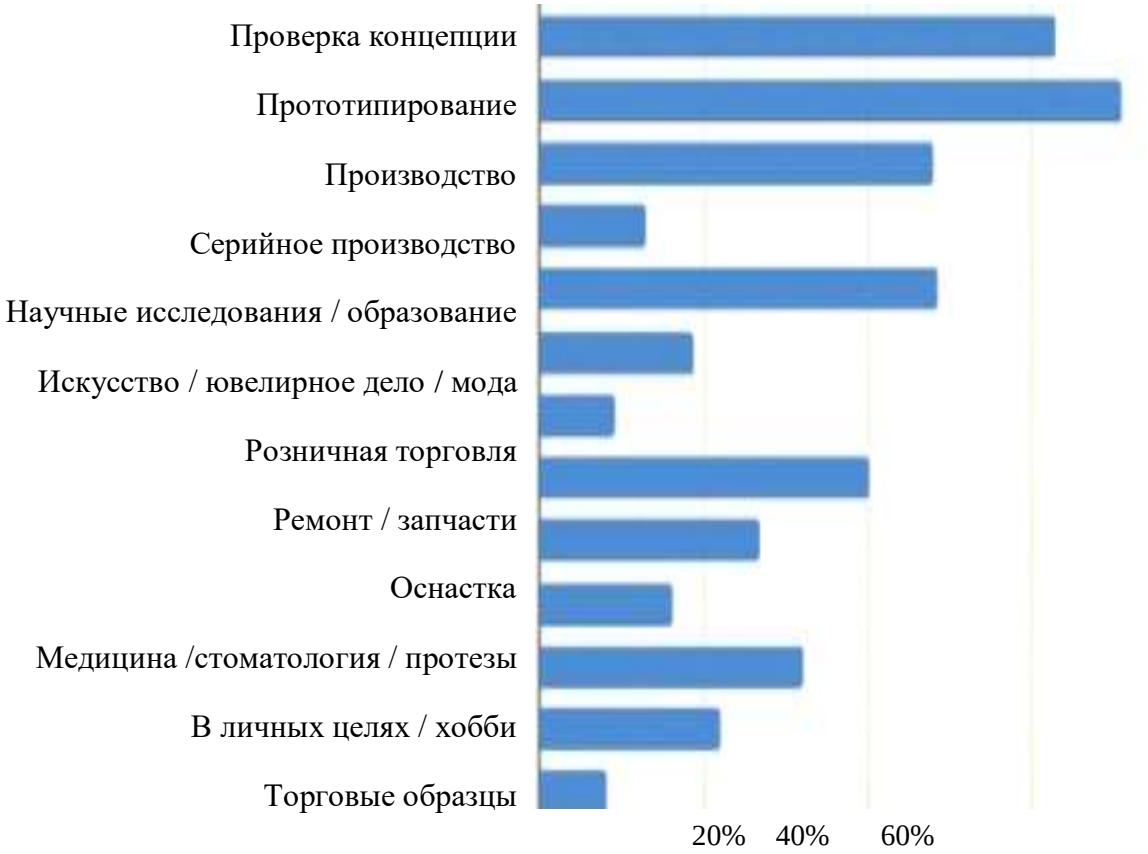


Рисунок 14.2 - Предпочтительные области применения аддитивных технологий

14.2 География рынка аддитивных технологий

АМ-технологии в разных странах развиваются неравномерно (рис. 14.1). В настоящее время основная доля в мировом развитии этих технологий приходится на несколько ведущих индустриальных стран, среди них первое место по масштабам их освоения занимают США. Можно ожидать, что со временем география рынка АМ-технологий будет расширяться, они будут получать все большее распространение во всех странах мира, чему в немалой степени будет способствовать снижение стоимости используемых для их реализации оборудования и материалов.

14.3 Ведущие участники рынка аддитивных технологий

Лидерами мирового рынка АМ-технологий являются следующие компании: 3D Systems (США), EOS Gmbh (Германия), SLM Solutions (Германия), Stratasys (США), Objet Geometries (США-Израиль), Envisiontec (США-Германия (DLP), ExOne (США), Voxeljet (Германия), Arcam AB (Швеция). Эти компании являются крупнейшими производителями 3D-принтеров.

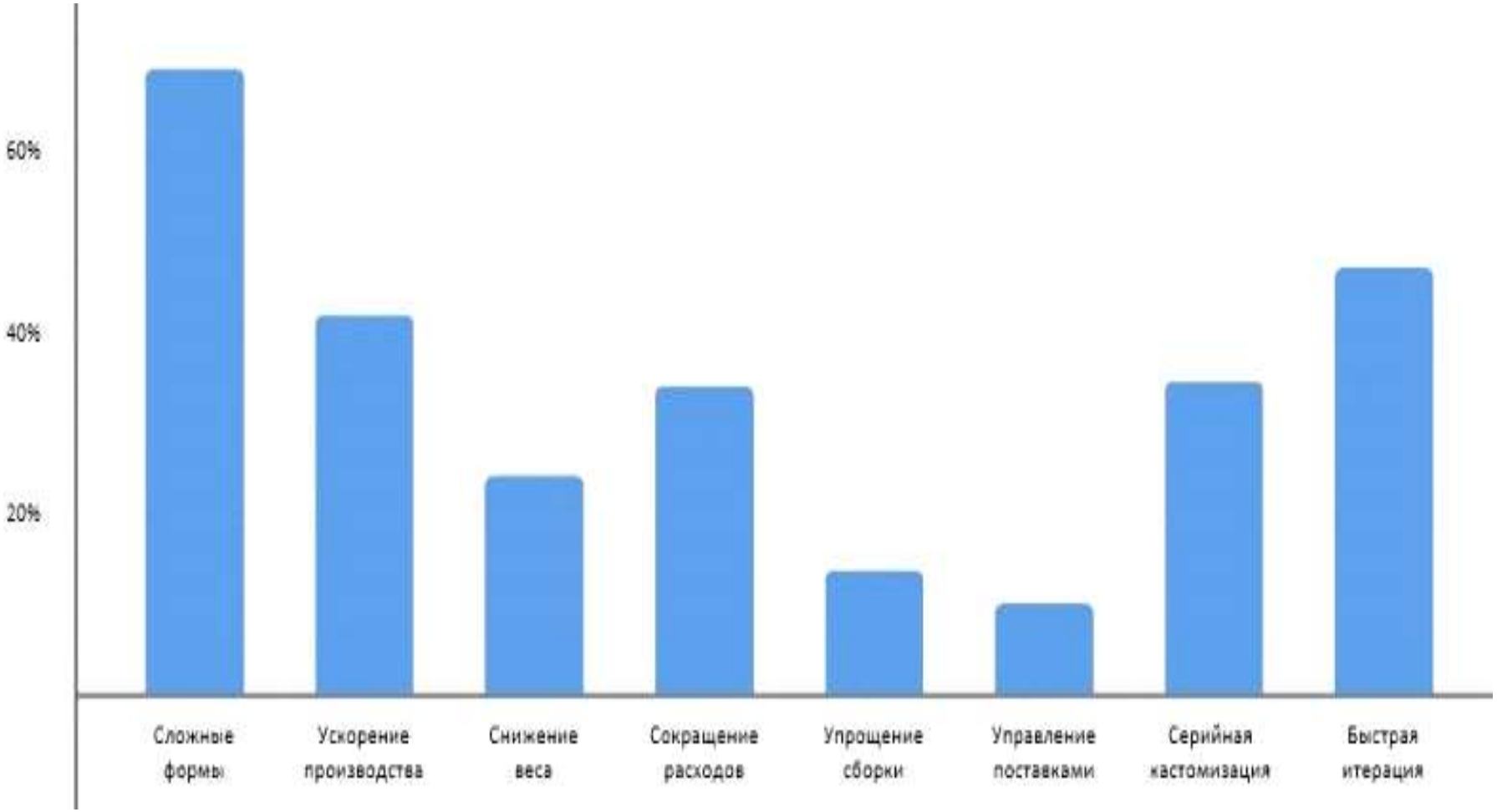


Рисунок 14.3 - Оценка преимуществ применения аддитивных технологий

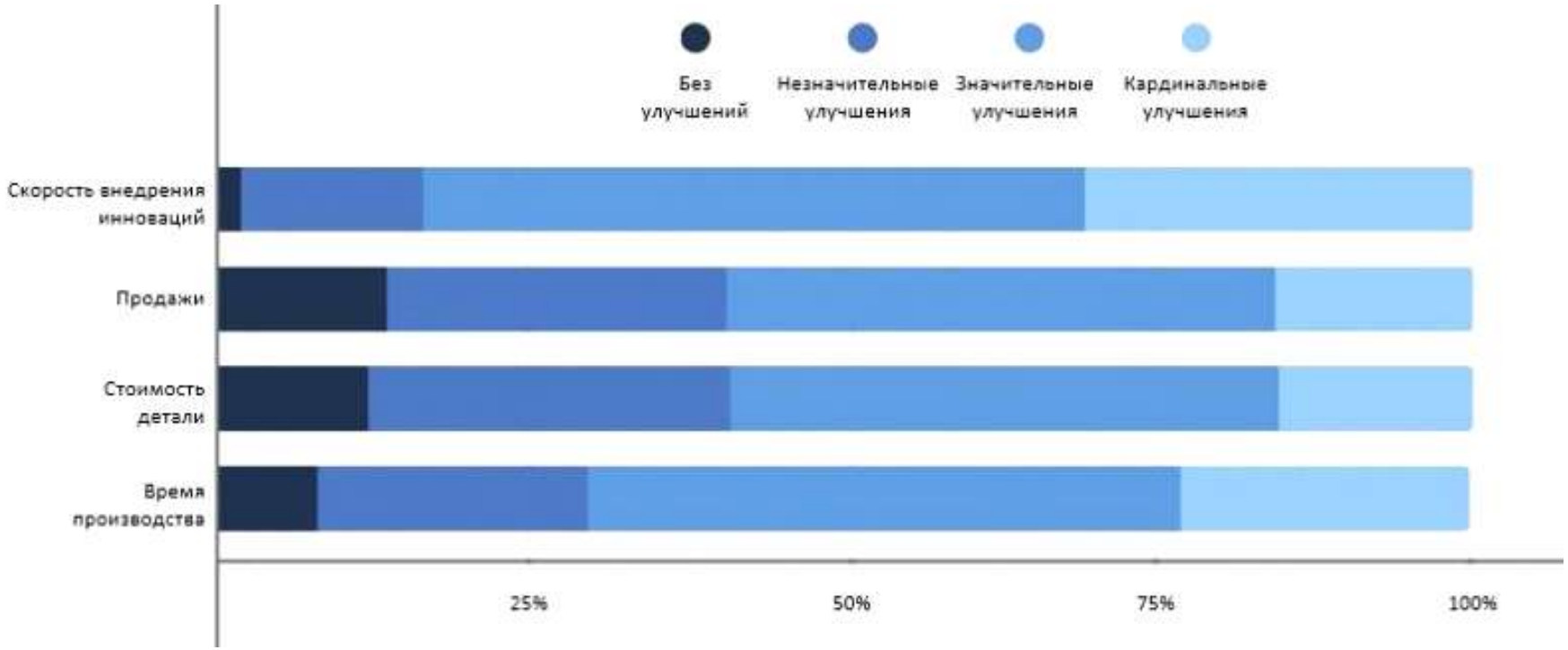


Рисунок 14.4 - Оценка успешности применения аддитивных технологий и его влияния на

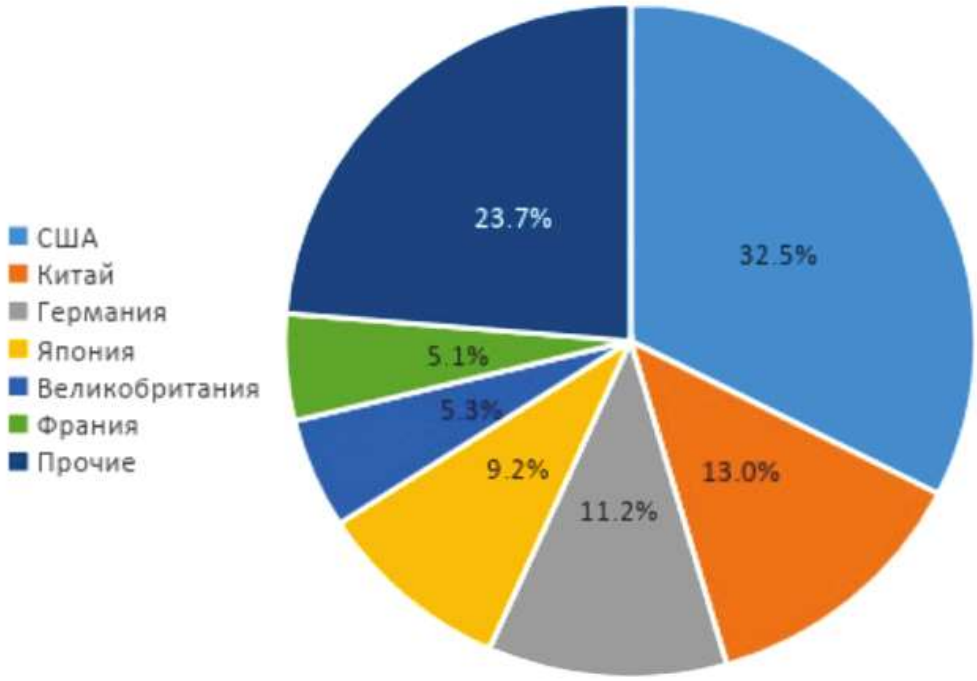


Рисунок 14.5 - Структура рынка аддитивных технологий
Сегмент «Прочие» включает Индию, страны Латинской Америки, Россию, Австралию, Швецию, Италию, Бельгию, Испанию и Нидерланды

14.4 Тенденции мирового развития аддитивных технологий

Повышение степени индустриализации

Индустриализация характеризуется созданием крупной, технически развитой промышленности, значительным увеличением ее доли в экономике. Повышение степени индустриализации, связанное с развитием АМ-технологий, означает: переход от изготовления прототипов изделий к производству все большего количества конечных (готовых) изделий; расширенное оснащение производственных предприятий АМ-оборудованием (3D-принтерами); автоматизация (роботизация) производственных процессов, основанных на использовании АМ-технологий; применение АМ-технологийдля создания гибких, быстро переналаживаемых производств.

АМ-технологии в своем применении будут все больше переходить от единичного производства к серийному производству.

Использование новых материалов

До недавнего времени в АМ-технологиях использовались в основном полимерные строительные материалы, кроме того, повышенное внимание уделялось металлическим порошкам. Ожидается, что в ближайшие годы произойдет переход к использованию микро- и

наноразмерных металлических порошков, что позволит получать более тонкую структуру металла при печати, использовать смеси порошков разных металлов, тем самым создавая металлические изделия с улучшенными свойствами. Кроме того предполагается ускоренное развитие 3D-печати композиционными материалами, в частности, на основе металлов и полимеров, а также 3D-печати технической керамикой.

Адаптация технологий

Применение АМ-технологий на производственном предприятии не должно приводить к резкой, радикальной перестройке традиционной производственной деятельности, сложившейся на предприятии. Эти технологии следует постепенно встраивать в производство. Другими словами, для них следует предусматривать определенный адаптационный период, после которого будут созданы необходимые условия для масштабных изменений в характере производства на основе все более широкого распространения АМ-технологий. Требование к адаптации АМ-технологий предполагает, что их применение не должно быть первоначально направлено на обязательное изготовление целиком всего сложного по конструкции узла. С их помощью могут изготавливаться отдельные элементы конструкции (детали). Также они могут широко использоваться для изготовления технологической оснастки и обрабатывающих инструментов. Кроме того, требование к адаптации АМ-технологий предполагает первостепенное развитие гибридных технологий производства изделий, органично сочетающих и АМ-технологии, и традиционные технологии.

Производство специальных изделий

Применение АМ-технологий будет востребованным, прежде всего, в тех направлениях, где они могут дать наибольший эффект, а именно – создавать изделия сложных форм, которые не могут быть достигнуты за счет традиционных технологий. Такие изделия, обладающие новыми функциональными свойствами, можно будет разрабатывать с помощью современных методов проектирования, возможности широкого использования которых открываются благодаря АМ-технологиям.

Предполагается, что все более значительное внимание будет уделяться применению АМ-технологий для изготовления особо ответственных изделий для нужд обороной и авиакосмической промышленности, энергетики. Вместе с тем, АМ-технологий по мере своего освоения будут все шире использоваться в автомобилестроении, а также других промышленных отраслях, обеспечивая повышение качества и снижение стоимости производимой продукции.

Разработка программных продуктов

Для успешного продвижения АМ-технологий в производство предполагается совершенствование программных продуктов, которые должны предназначаться для оптимизации, моделирования и подготовки

аддитивного построения изделий с учетом использования новых видов 3D-принтерами и строительных материалов. Предполагается разработка не только новых программ, но также новых форматов файлов для передачи информации.

Создание распределенных производств

Сегодня большинство предприятий, производящих ту или иную продукцию, расположено на значительном удалении от ее потребителей. Нередко предприятия размещаются в азиатских в странах (где имеется дешевая рабочая сила), а продукцию надо доставлять европейским потребителям. Как следствие, значительную часть стоимости продукции составляют транспортные расходы. Кроме того, из-за трудностей регулирования соотношений между масштабами производства и потребления значительная часть продукции остается невостребованной и выбрасывается в отходы.

В связи с развитием АМ-технологий предполагается создание системы распределенных производств, согласно которой небольшие предприятия, занимающиеся изготовлением продукции по АМ-технологиям, будут концентрироваться вблизи центров потребления. Каждое такое предприятие будет производить продукцию строго под заказ. Заказчику достаточно будет отправить на предприятие информацию о дизайне продукции по электронной почте, заказная продукция буде изготовлена на 3D-принтере и доставлена заказчику в тот же день. Благодаря отсутствию отходов и транспортных расходов стоимость продукции будет гораздо ниже то, которая производилась и доставлялась традиционными способами. Создание системы распределенных производств не только создает благоприятные условия для развития АМ-технологий вообще, но также расширяет возможности кастомизаиии изделий, т.е. изготовления их в строгом соответствии с индивидуальными запросами покупателя.

Консолидация рынка технологий

Развитие АМ-технологий предусматривает консолидацию их рынка путем организации консорциумов, объединяющих предприятия, производящие АМ-оборудование, и предприятия, использующих его в различных отраслях производства. В эти консорциумы также могут входить исследовательские центры и университеты, занимающиеся разработкой АМ-технологий.

Формирование таких альянсов в сфере АМ-технологий будет значительно способствовать производственному основанию этих технологий, их более эффективному использованию при создании новой продукции.

Развитие сервисных услуг

Предполагается, что с развитием АМ-технологий получат развитие и соответствующие услуги в сфере 3D-печати. Сервисное обслуживание получит значительное распространение в

таких направлениях, как: лизинг 3D-принтеров, подготовка компьютерных моделей заказываемых для 3D-печати изделий, консультации по вопросам выбора наиболее рациональных решений по применению AM-технологий и т.д.

Глобальный прогноз до 2025 года предполагает присутствие пяти| важнейших трендов-2020:

1. Пандемия COVID-19 встряхнула отрасль 3D-печати;
2. 3D-печать продолжает трансформироваться в производственную технологию;
3. ПО для аддитивного производства становится насущной необходимостью;
4. Материалы создают новые сценарии применения;
5. Меняется освоение технологии разными отраслями;

2020-й год стал серьезной встряской для всей мировой промышленности. Однако следует отметить и положительный эффект - глобальный кризис помог высветить преимущества 3D-технологий. Пришло четкое понимание того, что аддитивное производство способно оперативно справляться с трудностями, которые связаны с простоями предприятий и логистическим коллапсом, и может стать для бизнеса катализатором роста. На рисунке 14.6 показан прогноз рынка 3D-печати, которые показывают современные аналитики.

По данным компании Verified Market Research, мировой рынок 3D-печати оценивался в 2017 году в 8,08 млрд долларов США, с перспективой роста до 49,74 млрд к 2025 с совокупным среднегодовым темпом 25,5% в период 2018-2025 годов[17]. Главными движущими силами глобального рынка аддитивного производства аналитики считают:

- выгоды новых моделей производства и управления логистикой;
- растущий спрос на кастомизированные продукты;
- сокращение производственных издержек.

Fortune Business Insights в отчете, опубликованном в октябре 2020 года, прогнозирует увеличение объема рынка до 51,77 млрд долларов к 2026 году со среднегодовым ростом 25,8%. В сфере 3D-печати медицинских устройств в этом году произошел настоящий взрыв. Technavio в своем новейшем исследовании (ноябрь 2020) оценивает рост этого сегмента рынка на 1,572 млрд долларов в период 2020-2024 с совокупным среднегодовым темпом 13%. Производители и провайдеры услуг во всех уголках Земли оценили оперативность и экономичность 3D-печати, а также возможность изготавливать приспособления для помощи пациентам на месте, без привлечения поставщиков.

Более 50% профессиональных пользователей применяет аддитивные технологии для производства конечных изделий.

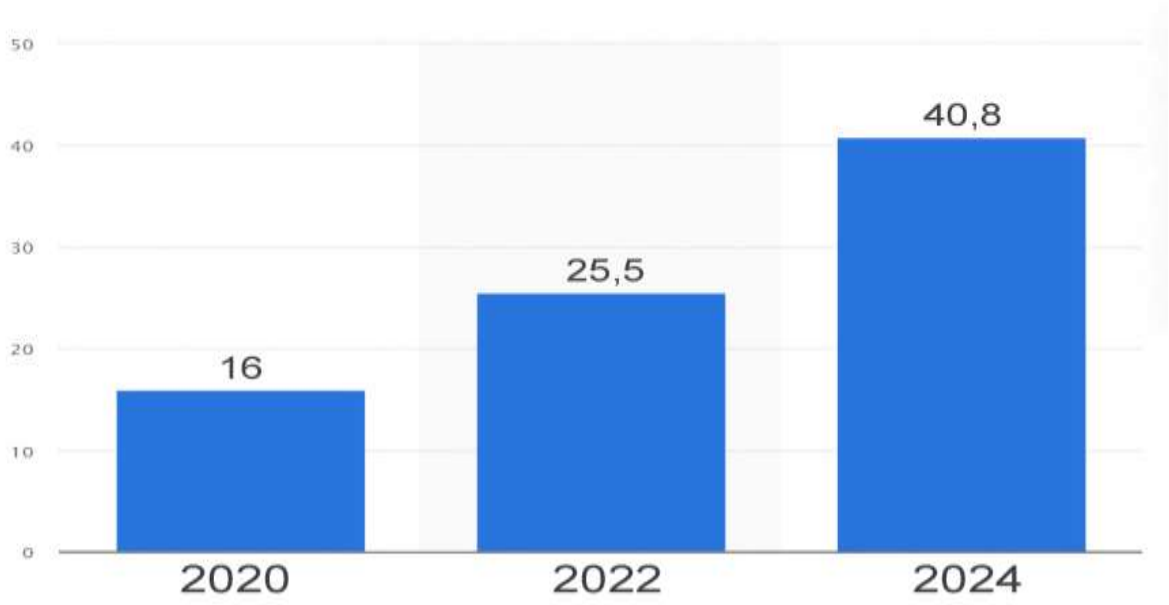


Рисунок 14. 6 - Рост рынка продуктов и услуг 3D-печати в 2020-2024 гг. в млрд долларов США [17]

Прогнозируется, что в период до 2025 года совокупный среднегодовой темп роста рынка 3D-печати составит более 25%. Продажи 3D-принтеров возрастут в два раза в ближайшие пять лет. Таким образом, разработка новых материалов и расширение областей их применения остаются наиболее перспективным трендом индустрии.

Контрольные вопросы

1. Какие виды аддитивных технологий занимают ведущие места на рынке аддитивных технологий?
2. В каких направлениях в основном используются аддитивные технологии?
3. Какую роль играют аддитивные технологии в бизнес-стратегиях?
4. Назовите основные факторы, сдерживающие применение аддитивных технологий.
5. Охарактеризуйте географию рынка аддитивных технологий.
6. Назовите ведущих участников рынка аддитивных технологий.
7. Назовите основные тенденции мирового развития аддитивных технологий.
8. Что означает повышение степени индустриализации, связанное с развитием аддитивных технологий?
9. Что понимается под адаптацией аддитивных технологий?
10. В чем состоят особенности создания распределенных производств в связи с развитием аддитивных технологий?
11. Что означает консолидация рынка технологий и какова ее роль?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1 Шило И.Н. Инновационные технологии технического сервиса в агропромышленном комплексе /И.Н. Шило, Н.К. Толочко, Н.Н. Романюк [и др.]. – СПб.: ИАЭП, 2021. – 260 с.

2 Толочко Н.К. Прогрессивные технологии технического сервиса в сельском хозяйстве: учебное пособие / Н.К. Толочко, С.О. Нукешев, Н.Н. Романюк, В.Н. Хлынов. – Нур-Султан: КазАТУ им. С.Сейфуллина, 2020. – 171с.

3 Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. – 220 с.

4 Шкуро А.Е. Технологии и материалы 3D-печати: учеб. пособие / А.Е. Шкуро, П.С. Кривоногов. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

5 Кулик В.И. Аддитивные технологии в производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники: учебное пособие / В.И. Кулик, А.С. Нилов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2018. − 160 с.

6 Федоренко В. Ф. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники / В. Ф. Федоренко, И. Г. Голубев. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. — 137 с.

Дополнительная

7 Толочко Н.К. Методологические аспекты оценки целесообразности применения аддитивных технологий для изготовления запасных деталей машин / Н.К. Толочко, В.М. Синельников, О.В. Сокол [и др.] // Агропанорама. – 2018. – №2. С. – 37-41.

8 Толочко Н.К. Применение технологии экструзионной 3D-печати в литейном производстве / Н.К. Толочко, А.А. Андрушевич, П.Н. Василевский, П.С. Чугаев // Литье и металлургия, 2018. №.4 С. 139-144.

9 Толочко Н.К. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // Агропанорама. – 2019. – №2. – С. 12-16.

10 Толочко Н. К. Проблемы применения аддитивных технологий для изготовления запасных деталей машин / Н. К. Толочко, В. М. Синельников, О. В. Сокол // Інженерія природокористування. – 2019. – №3. – С. 92-101.

11 Толочко Н.К. Аддитивные технологии: проблема ступенчатого рельефа поверхности / Н.К. Толочко, О.В. Сокол // Агропанорама. – 2019. – №2. – С. 12-16.

12 Толочко Н.К. Листовая штамповка металлов с помощью штампов, изготовленных с использованием аддитивной LOM-

технологии / Н. К. Толочко, О. В. Сокол // Агропанорама. – 2019. – №4. – С. 19-21.

13 Толочко Н.К. Методологические аспекты оценки эффективности аддитивной технологии листового ламинирования / Толочко Н.К., Сокол О.В. // Вестник машиностроения. – 2020. – №10. – С.11-15.

14 Толочко Н.К. Аддитивное производство деталей сельскохозяйственных машин / Толочко Н.К., Романюк Н.Н., Авраменко П.В., Сокол О.В. // Исследования, результаты (Алматы). – 2020. –№4. – С. 335-344.

15 Толочко Н.К. Проектирование и аддитивное производство деталей машин / Н.К. Толочко, П.В. Авраменко, О.В. Сокол, А.А. Груша, Д.И. Копчик // Агропанорама. – 2020. – №4. С. – 2-7.

16 Толочко Н.К. Аддитивные технологии и высшая школа / Толочко Н.К., Романюк Н.Н., Авраменко П.В.// Вышэйшая школа. – 2021. – № 1. – С. 38–43.

17 Wohlers Associates © Statista 2020

Стандарты

17 ГОСТ Р 57556-2017. Материалы для аддитивных технологических процессов. Методы контроля и испытаний.

18 ГОСТ Р 57558-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения.

19 ГОСТ Р 57589-2017. Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 2. Общие требования.

20 ГОСТ Р 59036-2020. «Аддитивные технологии. Производство на основе селективного лазерного сплавления металлических порошков. Общие положения».

21 ГОСТ Р 59037-2020. «Аддитивные технологии. Конструирование металлических изделий. Руководящие принципы».

22 ГОСТ Р 59038-2020. «Аддитивные технологии. Подтверждение качества и свойств металлических изделий».

23 ГОСТ Р 59184-2020. «Аддитивные технологии. Оборудование для селективного лазерного сплавления. Общие требования».

Толочко Николай Константинович
Нукешев Саяхат Оразович
Романюк Николай Николаевич
Мендалиева Сауле Ильинична

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ И РЕМОНТЕ МАШИН

Сдано в набор 20.02.2022
Формат 60x84 $^{1}/_{16}$
Объем 15,5 усл. п. л.

Подписано к печати 31.05.2022
Заказ № 2261
Тираж 6 экз.

Типография Казахского агротехнического университета им. С.Сейфуллина", 2022 г. 010011,

г. Нур-Султан, пр.Женіс 62 а, тел. 39-39-17